



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

PEKKA ERONEN
TEHTAAN KESKIJÄNNITEJAKELUN SELEKTIIVISYYSTARKAS-
TELU
Diplomityö

Tarkastaja: professori Pekka Verho
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 8. marras-
kuuta 2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

ERONEN, PEKKA: Tehtaan keskijännitejakelun selektiivisyystarkastelu

Diplomityö, 91 sivua, 6 liitesivua

Kesäkuu 2014

Pääaine: Teollisuuden sähkönkäyttötekniikka

Tarkastaja: professori Pekka Verho

Avainsanat: Teollisuusverkko, oikosulkusuojaus, maasulkusuojaus, selektiivisyys, relesuojaus

Työssä perehdytään UPM-Kymmene Oyj:n Rauman tehtaiden keskijänniteverkon oikos- ja maasulkusuojaukseen ja näiden toiminnan selektiivisyyden tarkasteluun. Lähtökohtana on ollut selvittää tehtaalla ilmenneiden epäselektiivisten suojaustoimintojen taustoja ja toteuttaa mahdollisimman perusteellinen selektiivisyystarkastelu yhteen verkon osaan niin sanottuna case-tarkasteluna. Case-tarkastelussa arvioidaan selektiivisen suojauksen toteutumista sekä ongelmakohtia, ja muodostetaan parannusehdotukset suojalaiteasettelujen ja laitehankintojen muodossa kohteeseen. Lisäksi kirjallisuusselvityksen ja kohdetarkastelussa syntyneiden työmenetelmien on tarkoitus toimia apuvälineenä, mikäli tarkastelua halutaan laajentaa jatkossa koko verkon laajuiseksi ja verkon uusintaprojektien yhteydessä.

Työssä on selvitetty lakien, standardien ja määräysten asettamia vaatimuksia suojaukselle. Tarkastelu pohjautuu tehtaalle aiemmin suoritettuun vikavirtalaskentaan, jossa oikosulkuvirrat on laskettu normaalissa kytkentätilanteessa standardin IEC 60909 mukaisesti ja verkon maasulkuvirrat yksivaiheisessa maasulussa. Laskennan tuloksia sovelletaan suojaustarkastelussa kirjallisuuslähteiden perusteella. Lisäksi tarkastelua varten on selvitetty verkon ja suojauksen laitteistoa ja kerätty niiden nimellis- ja asetteluarvoja. Oikosulkuvirrat, kuormitusvirrat ja suojien toiminta-arvoista muodostetut toimintakäyrät mallinnetaan selektiivisyyskäyrästöihin, joissa oikosulkusuojauksen selektiivisyys arvioidaan.

Pienet oikosulkuvirtaerot verkon eri vikakohdissa eivät mahdollista selektiivisyyden saavuttamista pelkästään ylivirtareleiden virta-asetteluilla, mihin nykyinen toiminta pitkälti perustuu. Selektiivisyys voidaan toteuttaa suojien välisiä toiminta-aikoja porrastamalla, jolloin täytyy kuitenkin varmistaa verkon laitteiston oikosulkukestoisuuden säilyminen. Releitä modernisoimalla voidaan porrassaikoja lyhentää, ja uudet releet mahdollistavat myös lukitussuojauksen, jolla voidaan toteuttaa samalla absoluuttisesti selektiivinen ja nopea suojaus.

Maasulun paikantaminen yleishälytyksen perusteella voi muodostua hankalaksi ja pitkittää maasulkua. Lähtökohtaista laukaisevaa maasulkusuojausta lisäämällä voidaan toiminta saattaa selektiiviseksi, jolloin riskitekijät oikosulkuun kehittymiselle, lisävaurioihin ja henkilöturvallisuudelle vähenevät. Tämä edellyttää vanhimpien releiden modernisointia sekä kaapelivirtamuuntajien hankintaa.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

ERONEN, PEKKA: Selectivity review of plant's medium voltage distribution

Master of Science Thesis, 91 pages, 6 Appendix pages

June 2014

Major: Industrial electricity consumption technology

Examiner: Professor Pekka Verho

Keywords: Industrial network, short circuit protection, earth fault protection, selectivity, relay protection

This thesis focuses on short-circuit and ground-fault protection selectivity in a medium-voltage network in UPM-Kymmene OYj factory in Rauma. Starting point was to find background information on non-selective protective functions in the factory and implement a comprehensive selectivity review in part of the network as a so called Case-review. Focus in the Case-review is on realization and problems of selective protection. Additionally, improvement suggestions in form of device purchases and protector device settings are being introduced in the target facility. Work methods based on the literature and target facility review are meant to be tools that can be used in the future for expanding the review to cover the whole network, and also in a network upgrade project.

Requirements based on the law, standards and regulations, are covered in this thesis. The review is based on an earlier fault current calculation in the factory. The short circuit current calculations were calculated in a normal network mode according to standard IEC60909 and network earth-fault current in a single-phase earth-fault. Results of the calculations are applied in protection review based on the literature. Furthermore, network and protection devices are reviewed, and nominal- and setting values are collected. Function curves, based on short-circuit current, load current and protection function values, are modeled to selectivity curves, in which short-circuit withstand is approximated.

Short circuit current differences in separate parts of the network prevent from achieving selectivity based on over current relay settings, in which the present activity is largely based on. Selectivity can be achieved by staggering function times of the present activities, keeping in mind that short-circuit withstand of the devices in the network must persist. By modernizing the relays the staggering times can be reduced. Additionally, new relays enable lock protection, which also allows implementing absolutely selective and fast protection.

Locating earth-fault based on a general alarm can be difficult and prolong the earth-fault. Selectivity can be achieved by increasing the principle triggering earth-fault protection, in which case risk factors are decreased for short circuit development, additional damages and personal safety. This requires modernizing the oldest relays and purchasing cable current transformers.

ALKUSANAT

Tämä on UPM-Kymmene Oyj:n Rauman tehtaille tekemäni diplomityö. Työn aiheen ehdotti minulle keväällä 2013 sähkökäytön ja –töiden johtaja Mikko Ahonen, joka toimi myös työn ohjaajana. Työn tarkastajana on toiminut Tampereen teknillisen yliopiston puolelta professori Pekka Verho. Heitä haluan kiittää työn ohjauksesta, tarkastuksesta ja saamistani neuvoista. Lisäksi kiitän UPM Rauman henkilöstöä ja etenkin automaatiokunnossapidon työntekijöitä heiltä saamistani tiedoista. Lopuksi esitän erityiskiitokset lähipiirilleni eritoten avopuolisolleni Heidille tuesta ja veljelleni Matille neuvoista opinnäytteen ulkoasuun liittyvissä asioissa.

Tampereella 13.5.2014

Pekka Eronen

SISÄLLYS

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Teollisuusverkon erityispiirteet..... | 2 |
| 3 | Lait, standardit ja määräykset | 4 |
| 3.1 | SFS 6001 | 4 |
| 3.2 | Sähköturvallisuusmääräykset A1-93..... | 5 |
| 3.2.1 | Suojausta koskevat yleiset määräykset | 6 |
| 3.2.2 | Ylivirtasuojaus | 6 |
| 3.2.3 | Maasulkusuojaus..... | 7 |
| 4 | Oiko- ja maasulkuviat | 8 |
| 4.1 | Aiheuttajat..... | 8 |
| 4.2 | Seuraukset | 9 |
| 4.3 | Vikatyypit..... | 10 |
| 4.3.1 | Kolmivaiheinen oikosulku..... | 11 |
| 4.3.2 | Kaksivaiheinen oikosulku..... | 11 |
| 4.3.3 | Maasulku..... | 13 |
| 4.3.4 | Kaksoismaasulku | 13 |
| 4.4 | Oikosulkuvirta – ja suureet | 14 |
| 4.4.1 | Oikosulkuvirran komponentit ja vaimeneminen..... | 15 |
| 4.4.2 | Alku-, muutos- ja jatkuva oikosulkuvirta | 18 |
| 4.4.3 | Sysäysoikosulkuvirta i_p | 19 |
| 4.4.4 | Katkaisuvirta I_b | 20 |
| 4.4.5 | Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta I_{th} | 22 |
| 4.5 | Maasulkuvirrat ja -jännitteet | 24 |
| 4.5.1 | Maasta erotettu verkko..... | 25 |
| 4.5.2 | Sammutettu eli kompensoitu verkko | 28 |
| 4.5.3 | Suoraan tai impedanssin kautta maadoitettu verkko..... | 29 |
| 4.6 | Vikavirtalaskenta..... | 29 |
| 5 | Relesuojaustekniikka..... | 31 |
| 5.1 | Kytkinlaitteet..... | 31 |
| 5.2 | Erilaiset releet rakenteen mukaan | 32 |
| 5.2.1 | Sähkömekaaniset releet..... | 32 |
| 5.2.2 | Staattiset eli elektroniset releet | 33 |
| 5.2.3 | Numeeriset eli mikroprosessorireleet | 34 |
| 5.3 | Releiden toimintatavat | 35 |
| 5.3.1 | Virtareleet | 35 |
| 5.3.2 | Jännitereleet | 36 |
| 5.3.3 | Suunta- ja tehoreleet | 37 |
| 5.3.4 | Vertoreleet | 37 |
| 5.3.5 | Muut releet..... | 38 |
| 5.4 | Mittamuuntajat | 38 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.4.1 | Jännitemuuntajat | 39 |
| 5.4.2 | Virtamuuntajat | 42 |
| 5.4.3 | Uudet mittaustekniikat | 45 |
| 6 | Selektiivinen suojaus..... | 47 |
| 6.1 | Oikosulkusuojauksen toteuttaminen | 47 |
| 6.1.1 | Moottorilähdön suojaus | 47 |
| 6.1.2 | Muuntajalähdön suojaus | 48 |
| 6.1.3 | Jakeluverkon suojaus | 50 |
| 6.2 | Maasulkusuojauksen toteuttaminen | 51 |
| 6.2.1 | Yleishälytys | 51 |
| 6.2.2 | Lähtökohtainen suojaus | 52 |
| 6.2.3 | Kaksoismaasulku | 52 |
| 7 | Kohdeyrityksen sähköverkko..... | 54 |
| 7.1 | UPM Rauman tehdas | 54 |
| 7.2 | Sähkönjakelun rooli tehtaan tuotannossa | 55 |
| 7.3 | Tehtaan sähköverkko | 56 |
| 7.3.1 | 110 kV alueverkko..... | 56 |
| 7.3.2 | Keskijänniteverkko | 56 |
| 7.3.3 | Pienjänniteverkot | 57 |
| 7.3.4 | Maadoitusjärjestelmä | 58 |
| 7.4 | Tehdasverkon vikavirtalaskenta..... | 58 |
| 7.5 | Tehtaan keskijänniteverkon suojaus | 59 |
| 7.6 | Keskijännitekojeistot..... | 60 |
| 7.7 | Aiemmat selektiivisyystarkastelut | 61 |
| 7.8 | Tehtaalla ilmenneitä vikatilanteita | 62 |
| 8 | Case-tarkastelu | 65 |
| 8.1 | Tutkittava verkon osa | 65 |
| 8.2 | Verkon osan suojaus yleisesti | 66 |
| 8.3 | Ylivirtasuojauksen tarkastelu | 67 |
| 8.3.1 | Selektiivisyyskäyrästä | 68 |
| 8.3.2 | Muuntajalähtöjen oikosulkusuojaus | 71 |
| 8.3.3 | Moottorilähtöjen suojaus | 76 |
| 8.3.4 | Jakeluverkon suojaus | 76 |
| 8.3.5 | Oikosulkukestoisuuden tarkastaminen | 80 |
| 8.3.6 | Ylivirtasuojaustarkastelun tulokset..... | 82 |
| 8.4 | Maasulkusuojauksen tarkastelu..... | 83 |
| 8.4.1 | Nykyisen suojauksen toiminta | 83 |
| 8.4.2 | Suojauksen kehittäminen | 84 |
| 9 | Johtopäätökset..... | 86 |
| | Lähteet..... | 88 |
| | Liite1: Ylivirtareleen suositeltavat vähimmäisasennetut kytkettävän muuntajatehon suhteen | |

Liite2: PK1:n ja hiomon jakelukaavio

Liite3: Relesuojaustoiminnot

LYHENTEET, TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

| | |
|-----------------|--|
| 2A | Tehtaan Sepän portin puoleinen 110 kV kytkinkenttä |
| 3A | Tehtaan pääportin puoleinen 110 kV kytkinkenttä |
| C | Kondensaattori |
| Dyn | Muuntajan kolmio-tähtikytkentä, jossa toision tähtipiste on maadoitettu. |
| HK5, HK6 | Voimalaitoksen höyrykattilat 5 ja 6 |
| I> | Ylivirtareleen hidas porras |
| I>> | Ylivirtareleen nopea porras |
| I>>> | Ylivirtareleen nopein porras |
| K | Kytkin |
| L | Kela |
| KA- järjestelmä | Kisko-apukisko-järjestelmä |
| KJ | Keskijännite (1–70 kV) |
| KK- järjestelmä | Kaksoiskisko-järjestelmä |
| KK- järjestelmä | Kaksoiskisko-apukiskojärjestelmä |
| LWC-paperi | Päällystetty erittäin kiiltävä aikakauslehtipaperi |
| PEX | Ristisilloitettu polyeteeni |
| PK1..PK4 | Paperikoneet 1, 2, 3 ja 4 |
| PJ | Pienjännite (< 1000 V) |
| SC-paperi | Superkalanteroitu kiiltävä aikakauslehtipaperi |
| TMP1..4 | Kuumahiirtämöt 1, 2, 3 ja 4 |
| UPS | Varmennettu sähkönsyöttöjärjestelmä |
| YNd11 | Muuntajan tähti-kolmiokytkentä, ensiön tähtipiste maadoitettu, toision vaihejänniteosoittimet 330 astetta jäljessä vastaavia ensiön vaihejänniteosoittimia |
| YNyn0 | Muuntajan tähti-tähtikytkentä, jossa sekä ensiön että toision tähtipisteet maadoitettu, ei kulmaeroa ensiön ja toision vaihejännitteiden välillä |
| α | Jännitteen vaihekulma nollakohdasta laskettuna oikosulun alkuhetkellä |
| κ | Sysäyskerroin |
| τ | Oikosulkupiirin aikavakio |
| τ'' | Oikosulkupiirin alkuaikavakio |
| τ' | Oikosulkupiirin muutostilan aikavakio |
| τ''_{d0} | Tyhjäkäyntitilan alkuaikavakio |
| τ'_{d0} | Tyhjäkäyntitilan muutosaikavakio |
| μ | Katkaisukerroin |
| ω | Kulmataajuus |
| φ_k | Oikosulkupiirin impedanssin vaihekulma |

| | |
|-------------------|---|
| c | Jännitekerroin |
| C_0 | Maakapasitanssi |
| C_{0j} | Viallisen lähdön yhden vaiheen maakapasitanssi. |
| \underline{E} | Generaattorin pysyvän tilan sähkömotorinen voima |
| \underline{E}' | Generaattorin muutostilan sähkömotorinen voima |
| \underline{E}'' | Generaattorin alkutilan sähkömotorinen voima |
| F_s | Mittarivarmuuskerroin |
| \underline{I} | Tahtikoneen kuormitusvirta ennen oikosulkua |
| I_{1s} | Yhden sekunnin terminen oikosulkuvirta |
| I_b | Katkaisuhetken oikosulkuvirta |
| I_C | Kapasitiivinen maasulkuvirta |
| I_{dyn} | Dynaaminen mitoitusvirta |
| I_e | Verkon maasulkuvirta ilman vikaresistanssia |
| I_{ef} | Maasulkuvirta |
| I_f | Vikavirta |
| I_{ej} | Johtolähdön tuottama maasulkuvirta ilman vikaresistanssia |
| i_k | Oikosulkuvirta |
| I_k | Jatkuvan tilan oikosulkuvirta |
| I_L | Induktiivinen maasulkuvirta |
| I''_{k2E} | Vaiheessa kulkeva alkuoikosulkuvirta kaksivaiheisessa maa-oikosulussa |
| I''_{kE2E} | Maahan menevä alkuoikosulkuvirta kaksivaiheisessa maa-oikosulussa |
| I''_{kEE} | Vaiheiden välillä kulkeva alkuoikosulkuvirta kaksoismaasulussa |
| I_{nG} | Generaattorin nimellisvirta |
| i_p | Sysäysoikosulkuvirta |
| i_{prim} | Mitattavan ensiöpiirin virta |
| I_p | Ensiövirta |
| I_{pn} | Mitoitusensiövirta |
| I_{sn} | Mitoitustoisiovirta |
| I_{th} | Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta |
| I'_k | Muutostilan oikosulkuvirta |
| I''_k | Alkuoikosulkuvirta |
| I''_{kG} | Generaattorin alkuoikosulkuvirta |
| I''_{k1} | Alkuoikosulkuvirta yksivaiheisessa maasulussa |
| I''_{k2} | Alkuoikosulkuvirta kaksivaiheisessa oikosulussa |
| I''_{k3} | Alkuoikosulkuvirta kolmivaiheisessa oikosulussa |
| $\sum I_v$ | Taustaverkon syöttämä maasulkuvirta |
| k_n | Mitoitusjännitekerroin |
| K_n | Mitoitusmuuntosuhde |
| L_k | Piirin oikosulkuinduktanssi |

| | |
|-----------------|--|
| M | Kelan herkkyys |
| m | Tasavirtatekijä |
| n | Vaihtovirtatekijä |
| p | Moottorin napaparien lukumäärä |
| P_{nM} | Moottorin nimellispäätöteho |
| q | Korjauskerroin moottoreiden katkaisuoikosulkuvirran laskentaa varten |
| R_d | Generaattorin resistanssi |
| R_f | Vikaresistanssi |
| R_k | Oikosulkuresistanssi |
| R_n | Verkon resistanssi vikapaikan ja generaattorin välillä |
| S_n | Nimellistaakka |
| u | Muuntajan muuntosuhde |
| t_{CB} | Katkaisijan kokonaistoiminta-aika oikosulussa |
| Δt_{DT} | Vakioaikatoimintaisen releen porrasaika |
| t_E | Releen toiminta-ajan toleranssi |
| t_M | Porrasajassa huomioitava varmuusmarginaali |
| t_R | Releen retardaatio- eli pyörtöaika |
| \hat{u} | Sinimuotoisen jännitteen huippuarvo |
| $u(t)$ | Jännite ajanhetkellä t |
| u_{out} | Mittauksen ulostulojännite |
| U_0 | Nollajännite |
| U_{ng} | Tahtikoneen nimellinen vaihejännite |
| U_p | Ensiöjännite |
| U_{pn} | Mitoitusensiöjännite |
| U_{prim} | Mittauksen ensiöjännite |
| U_s | Toisiojännite |
| U_{sn} | Mitoitustoisiojännite |
| U_{sec} | Mittauksen toisiojännite |
| X_d | Generaattorin pysyvän tilan reaktanssi |
| X'_d | Generaattorin muutostilan reaktanssi |
| X''_d | Generaattorin alkureaktanssi |
| X_k | Piirin oikosulkureaktanssi |
| X_n | Verkon reaktanssi vikapaikan ja generaattorin välillä |
| Z_k | Oikosulkupiirin impedanssi |

1 JOHDANTO

Sähköverkon suojauksessa tulee verkon ja laitteiden vaiheiden väliset oikosulut sekä vaiheen tai vaiheiden väliset maasulut tunnistaa ja irtikytkeä niin, ettei sähkölaitteistolle ja henkilöturvallisuudelle koituisi välitöntä vaaraa [SFS 6001+A1+A2 2009]. Suojauksen tulisi toimia selektiivisesti niin, että vain vikaantunut verkon osa erotetaan käyttöhäiriön vaikutusten rajaamiseksi [Elovaara 2011]. Selektiivistä suojausta suunniteltaessa on huomioitava verkon komponenttien oikosulkukestoisuudet ja varmistuttava suojauksen toiminnan säilymisestä verkon muutosten yhteydessä [Pirttilä 1982]. Oiko- ja maasulkuvikaa vastaan suojautuakseen täytyy tuntea vian ilmetessä esiintyvä vikapiiri, sen vikavirrat sekä vikavirtaan liittyvät suureet, joiden perusteella verkko mitoitetaan ja suojataan kestäämään siinä esiintyvät oiko- ja maasulkuviat. [Oikosulkukysymykset 1973]

Työssä tarkastellaan UPM-Kymmene Oyj:n Rauman tehtaiden keskijännitejake-luverkon oiko- ja maasulkusuojausta sähköverkon selektiivisyyden kannalta. Koko keskijänniteverkon laajuisia selektiivisyystarkasteluja on toteutettu viimeksi 1980-luvulla, minkä jälkeen verkko on kokenut uudistuksia ja kytkentätilanteen muutoksia. Tehtaalla on ilmennyt myös joitain epäselektiivisiä suojaustoimintoja lähivuosina. Lisäksi tehtaalla on osin peräti alkuperäistä 1960-luvulla käyttöönotettua suojauslaitteistoa, jonka uusiminen on jo elinkaaren kannalta ajankohtaista.

Työssä selvitetään teollisuusympäristön erityispiirteitä sekä lakien, standardien ja määräysten mukaiset vaatimukset suojaukselle. Taustatietoina käsitellään oiko- ja maasulkutilanteisiin liittyviä virtoja ja jännitteitä sekä keskijänniteverkon suojauksessa käytettävää relesuojaustekniikkaa. Verkon laajuuden vuoksi keskitytään yhden verkon osan tarkasteluun case-muodossa. Verkon osan valintaan on vaikuttanut sen moninaisuus rakenteen, kuormituksen ja suojalaitteiston osalta, minkä pohjalta voisi jatkossa siirtyä yksinkertaisempien kohteiden tarkasteluun.

Case-tarkastelussa muodostetaan syöttävän verkon, kaapelien, kuormituksen, suojalaitteiden ja verkon vikavirtojen perusteella käsitys suojauksen selektiivisyydestä. Vikavirtatiedot perustuvat valmiiseen vikavirtalaskentaan, jota sovelletaan tarvittavin osin suojauksen tarkastelemiseen. Tarkoituksena on tunnistaa suojauksen ongelmakohdat ja laatia parannusehdotukset. Case-mallia ja sen pohjalta syntyneitä tuloksia voisi käyttää jatkossa apuvälineenä muun verkon suojauksen ja selektiivisyyden tarkastamiseen sekä projektien yhteydessä verkkoa uusittaessa. Tämän kirjallisen raportin yksi tarkoitus onkin toimia tiivistelmänä asiaa käsittelevästä lähdekirjallisuudesta tehtaan käyttöhenkilökunnalle sekä projektisuunnittelijoille.

2 TEOLLISUUSVERKON ERITYISPIIRTEET

Teollisuus on merkittävin sähköenergian käyttäjä Suomessa, ja sille on ominaista suuri energiaintensiteetti. Teollisuusprosessissa käytetään lisääntyvässä määrin sähköenergiaa. Teollisen tuotantolaitoksen tavoite on tuottaa kulutettavaa hyödykettä tehokkaasti ja edullisesti. Tämä on johtanut pitkälle automatisoituneeseen prosessiin, mikä lisää sähkönjakelun merkitystä tuotantoon. Lisääntynyt elektroniikka aiheuttaa toisaalta lisää häiriöitä, ja on itsessään herkempi teollisuusverkon ja ulkopuolisen verkon tuomille häiriöille. Häiriöihin varautuminen on olennainen osa sähköön käytön varmuutta, jolla voidaan säästää häiriökustannuksissa, jotka määräytyvät suuresti tuotannon menekistä. Teollisuuden sähköjärjestelmältä vaaditaan käytön varmuuden, henkilö- ja omaisuusturvallisuuden sekä ylläpidettävyyden lisäksi taloudellisuutta. Taloudellisuuteen vaikuttaa häiriökustannusten ohella hankintakustannukset sekä käyttö- ja ylläpitokustannukset.

Teollisuussähköverkon hankintakustannukset ovat usein varsin pienet noin 5-15 % koko tehtaan hankintakustannuksista. Usein sähköverkkoa pidetäänkin toissijaisena järjestelmänä tuotantolaitoksessa, jonka tarkoitus on vain tarjota tuotantoon käytettävä energia. Sähköverkkoon ja käytön varmuuteen liittyviin puutteisiin havahdutaan usein vasta ongelmien ilmaantuessa. Asianmukaisella sähköverkon suunnittelulla ja kunnossapidolla on kuitenkin mahdollista välttää niin suuret ja kalliit laiterikot ja pitkät käyttökatkot kuin lyhyemmätkin häiriötilanteet. Tällöin on vertailtava sähköhäiriöistä aiheutuvia kustannuksia sähköverkon hankinta- ja käyttökustannuksiin ja löydettävä tasapaino riittävän käyttövarman järjestelmän rakentamiseksi. Kustannusten arviointiin ja sähköjärjestelmän suunnitteluun tuo omat haasteensa teollisuuden sähköjärjestelmälle tyyppinen kehittyminen muun prosessin ehdoin. Laitteistoa uusitaan pääasiassa prosessia uudistettaessa tai laajennettaessa tai vanhan laitteiston vikaantuessa, jolloin verkon rakenne ja komponenttijakauma muodostuu kirjavaksi. Erot komponenttien iässä ja toimintatavoissa ovat usein laajat. [Lehto 2002]

Suuri teollisuuslaitos liittyy ulkopuoliseen verkkoon yleensä 110 kV jännitteellä. Jakelu tapahtuu suurimmaksi osaksi keskijänniteverkossa, jota käytetään yleensä säteettäisesti. Verkko voi olla rakenteeltaan osittain silmukoitu siten, että varayhteyksiä käytetään varsinaisen syöttöyhteyden vikaantuessa. Lyhytaikaista rinnankäyttöä esiintyy kytkentätilan muutosten yhteydessä. Säteettäisen käytön ansiosta oikosulkuvirrat/tehot ovat pienempiä ja suojauksen toteutus yksinkertaisempaa. Säteittäinen verkon käyttö tarkoittaa kuitenkin aina paikallista käyttökatkoa vian ilmetessä. Keskeytysajat pitenevät entisestään, mikäli varayhteyttä ei ole. [Lehto 2002]

Verrattuna sähkölaitosverkkoihin teollisuusverkon johtopituudet ovat lyhyitä ja suuritehoiset kuormitukset tiheällä alueella. Vähäisen tilan sekä turvallisuuden ja käyt-

tövarmuuden takia johtoina käytetään kaapeleita. Toisaalta kaapelin kuormitettavuus ja termisen oikosulkuvirran kestoisuus ovat läpimitaltaan vastaavaa avojohtoa huonompia, jolloin on käytettävä poikkipinnaltaan suurempia johtimia. Kuormavirrat ovat suuria, jolloin vaaditaan entistä vahvempia johtoja, jotta häviöt ja jännitteen alenemat pysyvät kurissa varsinkin moottorien käynnistystilanteissa. Suojauksen kannalta johdon kuormitettavuus on huomioitava ylikuormitussuojan osalta ja terminen kestoisuus riittävän lyhyillä oikosulun laukaisuaajoilla.

Vahvan syöttävän verkon, oman tuotannon, suurten tahtimoottorien ja lukuisten oikosulkumoottorien takia oikosulkuvirrat vikojen ilmetessä ovat huomattavan suuria. Tämä vaatii osaltaan virran rajoituskeinojen käyttöä, mutta varsinkin oikosulkusuojauksen nopeaa ja varmaa toimintaa. Laitteiden tai kojeistojen oikosulkukestoisuuksien ylityessä on joko uusittava laitteistoa tai rajoitettava oikosulkuvirtojen suuruuksia. Oikosulkuvirtojen suuruuksiin voidaan vaikuttaa verkon kytkentätilanteen muutoksilla, mikä ei välttämättä ole käyttövarmuuden kannalta paras vaihtoehto. Oikosulkuvirran rajoittaminen esimerkiksi sarjakuristimella voi tulla kyseeseen. Yhdeksi vaihtoehdoksi jää suojauksen toiminta-aikojen lyhentäminen selektiivisyyden kustannuksella, mikä heikentää myös käyttövarmuutta. Lisäksi lyhyet välimatkat ja vahvat kaapelit aiheuttavat sen, etteivät oikosulkuvirrat eroa paljoakaan verkon eri pisteiden välillä, mikä aiheuttaa oman haasteensa selektiiviselle suojaukselle. [Frantti 1989; Huotari 1998; Lehto 2002]

Maadoitusjärjestelmältään teollisuusverkko on yleensä maasta erotettu ja erillisten maadoitusten sijaan usein yhdistetty yhdeksi laajaksi maadoitusjärjestelmäksi. Tällöin yksivaiheinen maasulku aiheuttaa tavallisesti hyvin pienen maasulkuvirran, jota on hankala laukaista suojalaitteilla itsetoimivasti. Toisaalta etuna on mahdollisuus prosessin jatkamiseen ja sähkökatkon viivästäminen prosessin kannalta edulliseen ajankohtaan, mikäli turvallisuus ei vaarannu. Kuitenkin maasulku rasittaa laitteistoa, mikä vian kestoajan kasvaessa aiheuttaa kasvavan riskin vakavampiin vaurioihin ja verkon laajempaan käyttöhäiriöön. [Lehto 2002]

Teollisuusverkon suuritehoiset ja kookkaat laitteet ovat usein kalliita. Esimerkiksi prosessin kannalta kriittisiä ovat keskijännitemoottorit, joille ei ole usein korvaavaa konetta varastossa. Tämä tulee huomioida moottorin suojaustason kohdalla. Myös jakelumuuntajat voivat olla isoja nimellistehojen ollessa jopa muutaman MVA tasoa. Tilanne on erilainen verrattuna maaseutuverkkojen jakelumuuntajiin, joiden tehojen alkaessa muutamasta kVA niiden hankintahinta on helposti alhaisempi kuin huoltotyö tai vaativan suojauksen toteuttaminen. Automaattista jälleenkytkentää ei käytetä, jolloin sähköön takaisinkytkentä vaatii aina käyttöhenkilökunnan toimenpiteitä, vaikka pysyviä vaurioita ei syntyisikään. Toisaalta teollisuusverkon viat ovat lähes poikkeuksetta pysyviä. Erona sähkölaitosverkkoon korostuu, että teollisuusverkon johdonsuojareleiltä vaaditaan usein monipuolisempia ja kattavampia suojaustoimintoja.

3 LAIT, STANDARDIT JA MÄÄRÄYKSET

Sähkölaitteistoja koskevat tietyt ehdot, joista määräävimpänä on kauppa- ja teollisuusministeriön (nykyinen TEM eli työ- ja elinkeinoministeriö) laatima sähköturvallisuuslaki vuodelta 1996. Laki on varsin suurpiirteinen, ja tarkemmat määritelmät sen toteuttamiseen annetaan TUKES:n ohjeissa sekä kansallisissa SFS-standardeissa. [Elovaara 2011]

Standardi SFS 6001 määrittelee vaatimukset uusien suurjänniteasennusten sekä vanhojen asennusten korjaus-, muutos- ja laajennustöiden osalta. Vanhaan asennukseen tehtävissä töissä määrää työn laajuus sen, että voidaan työ tehdä vanhojen määräysten vai uuden standardin mukaisesti. Standardista löytyy tähän ohjeita. [SFS 6001+A1+A2 2009]

Standardi SFS-IEC 60050-448 määrittelee suojauksen tarkoitukseksi havaita sähköverkon viat tai häiriöt niiden selvittämiseksi ja poistamiseksi. Oiko- tai maasulun vioittama verkon osa on erotettava muusta verkosta vaaran ja laiterikkojen välttämiseksi. Sähköturvallisuuslain toisen luvun viidennessä pykälässä määrätään, että sähkölaitteiden ja -laitteistojen suunnittelu, rakentaminen, valmistus ja korjaus sekä niiden huolto ja käyttö tulee toteuttaa niin, että ne eivät:

- aiheuta vaaraa ihmisen hengelle, terveydelle eikä omaisuudelle.
- aiheuta kohtuutonta häiriötä sähköisesti tai sähkömagneettisesti.
- toiminnallisesti häiriinny helposti sähköisesti tai sähkömagneettisesti [Sähköturvallisuuslaki 1996]. [Elovaara 2011]

3.1 SFS 6001

SFS 6001-standardi lisäyksineen on Suomen standardisoimisliitto SFS:n laatima. SFS 6001 ilmestyi vuonna 2001, muutos SFS 6001/A1 vuonna 2005 ja viimeisin muutos SFS 6001/A2 vuonna 2009. Standardi pohjautuu CENELEC:n vuonna 1999 julkaisemaan yleiseurooppalaiseen HD 637-harmonisointiasiakirjaan.

Standardin SFS 6001 mukaan suurjänniteasennukset tulisi suunnitella ja toteuttaa kestävästi oikosulkuvirtojen mekaaniset ja termiset vaikutukset vaaratta. Verkon ja sähkölaitteiston vaiheiden väliset oikosulut suojauksen tulee kytkeä automaattisesti pois. Maasulku on ilmaistava ja vaarallinen maasulku laukaistava. Suojauslaitteen valintaan vaikuttaa tähtipisteen maadoitus. Oikosulun kestoajana standardissa käytetään yhtä sekuntia. Toissijaisesti käytettäväksi suositellaan 0,5 tai 3 sekunnin arvoja. Vian kesto aika tulee huomioida mitoituskestoajan tarkastelemisessa.

SFS 6001- standardin mukaan maasulun itsetoimivalla tai käsin suoritettavalla poiskytkennällä estetään maasulusta aiheutuvan kosketusjännitteen pitkäaikainen tai jatkuva esiintyminen. Poiskytkentä suositellaan tapahtuvan automaattisesti. On perusteltua käyttää poiskytkentää käsin hälytyksen seurauksena silloin, kun halutaan siirtää maasulun poiskytkemisestä aiheutuva keskeytys suosiollisempaan ajankohtaan. Tällöin on kuitenkin täytettävä seuraavat ehdot, jotka SFS 6001-standardi määrittelee seuraavasti:

- *”Verkon rakenteen tulee olla sellainen, että valokaarimaasulun todennäköisyys on pieni. Verkon on oltava joko kaapeliverkko tai ilmajohtoverkossa valokaari-maasulun on sammuttava itsestään.*
- *Maasulusta on tultava hälytys, joka saatetaan verkon käyttöä valvovan henkilön tietoon. Vian selvittämiseen on ryhdyttävä välittömästi. Käyttöä maasulussa voidaan jatkaa yleensä enintään kahden tunnin ajan, ellei ole ilmeistä, että maasulusta aiheutuu välitöntä vaaraa ihmisille tai omaisuudelle tai kohtuutonta häiriötä toiselle laitteistolle. Käyttöä maasulussa voidaan jatkaa pitempään vain, jos maasulun sijaintikohta on löydetty ja varmistetaan, ettei siitä aiheudu vaaraa. Jos maasulku sijaitsee jakelumuuntamolla, joka ei ole laajan maadoitusjärjestelmän alueella, ei käyttöä saa jatkaa.*
- *Jatkuvassa maasulussa esiintyvä maadoitusjännite saa olla korkeintaan pitkäaikaisesti sallitun maadoitusjännitteen suuruinen, kuitenkin korkeintaan 150 V.*
- *Televerkon asettamat vaatimukset on otettava huomioon.”*

Standardissa on esitelty sallitut kosketusjännitearvot ja menetelmät, joilla ne voidaan alittaa. Laaja maadoitusjärjestelmä toteuttaa standardin vaatimukset kosketusjännitteiden sallituista arvoista, jolloin maadoitusjännitevaatimuksetkin täyttyvät. Laaja maadoitusjärjestelmä määritellään standardissa SFS 6001 seuraavasti: *”Maadoitusjärjestelmä on tehty liittämällä useat paikalliset lähellä toisiaan olevat maadoitusjärjestelmät verkkomaisesti yhteen siten, että järjestelmä muodostaa lähes tasapotentiaalipinnan. Järjestelmän laajuus ja maadoitusverkon tiheys varmistavat sen, ettei kyseisellä alueella esiinny vaarallisia kosketusjännitteitä.”* [SFS 6001+A1+A2 2009]

3.2 Sähköturvallisuusmääräykset A1-93

Standardin SFS 6001 vaatimukset eivät koske sitä vanhempia asennuksia. Ennen SFS 6001-standardin voimaantuloa olivat voimassa Sähkötarkastuskeskuksen Sähköturvallisuusmääräykset A1-93, jotka olivat käytössä oleellisilta osin vuodesta 1974 lähtien vuoteen 2001 asti. [SFS 6001+A1+A2 2009]

Sähkölaitoksen osalta määrätään, että sen tulee olla jatkuvasti määräysten mukaisessa kunnossa. Tämä edellyttää säännöllistä huoltoa vaativien laitteiden, kuten suojalaitteiden ja katkaisijoiden osalta, että laitteiden hoitamista varten laaditaan ennalta kunnossapito-ohjelmat. Määräaikaistarkastuksissa tulee varmistautua huolto-ohjelmien asianmukaisista toteutumisista. Sähkölaitteiston vaurioitunut tai kuormitus- ja vikavirtoihin nähden alimitoitetuksi jäänyt osa tulee korjata, vahvistaa tai uusia. Sähkölaitok-

sesta tulee laatia ja olla saatavissa ajan tasainen kaaviollinen esitys niistä laitoksen käytössä ja hoidossa tarvittavista tiedoista, joita ei voida muuten helposti todeta. Tämä käsittää muun muassa verkosto-, johdotus- ja pääkaaviot sisältäen laitteiden tärkeimmät tekniset arvot. [Sähköturvallisuusmääräykset A1-93 1993]

3.2.1 Suojausta koskevat yleiset määräykset

Suojausta koskien määrätään, että jokaisen laitteiston, johtimen ja yksittäisen laitteen on kestävä suurin kuormitusvirtansa sekä sen ulkopuolella sattuvan oiko- ja maasulun vikavirta mekaanisesti ja termisesti aiheuttamatta vaaraa ympäristölleen. Oiko- ja maasulun mekaanisia ja termisiä rasituksia arvioidessa tulee huomioida suojauksen kokonaistoiminta-aika ja mahdolliset jälleenkytkennät. Oiko- ja maasulkuvirtoja täytyy tarvittaessa rajoittaa. Laitteiston virtojen kasvun tai suojauksen muutoksen, kuten sen kokonaistoiminta-ajan pitenemisen takia vaaralliseksi käyvä laitteisto on vahvistettava tai uusittava. Käyttötekniikan syiden takia tehtävät tilapäiset kytkentä- ja käyttötilanteet mahdollistavat laitteiston hetkellisen oikosulkulujuuden ylittymisen esimerkiksi muuntajien rinnankytkentätilanteessa. Rinnankytkennän aikainen oikosulku on kuitenkin kytkettävä nopeasti pois ja kytkinlaitteita ohjatessa niiden sijoitustiloissa ei saa olla henkilöitä. Määräysten vaatimien suojausjärjestelmien on toimittava luotettavasti. Erityisesti on huomioitava, ettei yhden laitteen vioittuminen tee suojasta tehottomaksi. Varsinkin suojausjärjestelmien apusähköpiirien toiminnan on oltava luotettavaa.

Ylivirta- ja maasulkusuojista ja niiden asetteluista täytyy pitää kirjaa. Yli 1000 V laitteiston ylivirta- ja maasulkusuojien asettelut, toiminta ja kunto tulee tarkistaa 1...3 vuoden välein määräaikaistarkastuksin, joissa suojien toiminta koetetaan, apusähköjärjestelmän toiminta ja suojien asettelut tarkastetaan. Enintään 1000 V jakeluverkon jakokeskukset sekä ylivirta- ja maasulkusuojat tulee tarkastaa 6 vuoden määräajoin mitoituksen ja kunnan osalta. [Sähköturvallisuusmääräykset A1-93 1993]

3.2.2 Ylivirtasuojaus

Sähkölaite on tarvittaessa varustettava ylikuormitussuojalla, jolloin on käytettävä myös oikosulkusuojaa. Enintään 1000 V palonkestävissä asennuksissa tulee oikosulkusuojaa käyttää myös silloin, kun oikosulkuvirran aiheuttama lämpeneminen aiheuttaa muuta ilmeistä vaaraa kuin palovaaran. Lisäksi määrätään: *”Yli 1000 V laitteisto on varustettava oikosulkusuojalla, joka kytkää järjestelmän missä tahansa sijaitsevan oikosulun itsetoimivasti ja nopeasti pois. Sellaista oikosulkua, joka sattuu laitteen sisällä tai muuntajan enintään 1000 V alajännitepuolella siten, että oikosulkuvirta jää (yli 1000 V) järjestelmän muiden laitteiden ja johtojen kannalta vaarattoman pieneksi, ei kuitenkaan tarvitse kytkeä itsetoimivasti pois, ellei laitteelle itselleen ole 8 § 1 mukaan vaadittu ylikuormitussuojaa.”*

Johto on mitoitettava kuormitusta vastaavaksi ja varustettava ylikuormitussuojalla, jos johdon lämpeneminen aiheuttaa vaaraa paitsi, jos virran katkaiseminen aiheuttaa suuremman vaaran kuin johdon lämpeneminen. Johdon oikosulkusuoja on mi-

toitettava riittävästi, ja sen tulee toimia nopeasti ja luotettavasti johdolla syntyvissä oikosuluissa.

Suuren poikkipinnan eristepäälysteisiä johtimia ($\geq 120 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ tai $\geq 150 \text{ mm}^2 \text{ Al}$) saa kytkeä rinnan. Jokainen johdin on varustettava omalla ylivirtasuojallaan johtimen molemmissa päissä. Käytettäessä yhteistä ylivirtasuojaa, tulee laskelmin tai mittauksin osoittaa suojauksen riittävyys eniten kuormittuvalle osajohtimelle. Samanlaisissa ja samanpituisissa kolmivaihekaapeleissa voidaan olettaa virran jakautuvan tasaisesti osajohtimien kesken. Jokaisen johtimen erikseen on termisesti ja dynaamisesti kestävävä suurin mahdollinen oikosulkuvirta.

Palo- tai räjähdysvaarallisessa sijaitseva muuntaja on varustettava ensiöpuolen oikosulkusuojalla ja ensiö- tai toisiopuolen ylikuormitussuojalla. Moottori on varustettava oikosulkusuojalla, ja sille suositellaan tarkoitukseen sopivaa ylikuormitussuojaa. [Sähköturvallisuusmääräykset A1-93 1993]

3.2.3 Maasulkusuojaus

Maasulkusuojauksen osalta määrätään: *”Sähkölaitos on tarvittaessa varustettava laitteilla, jotka antavat yksivaiheisesta maasulusta hälytyksen tai kytkvät maasulun itse toimivasti ja nopeasti pois. Maasulun hälytys- tai erotuslaitteen on toimittava äärijohtimesta suojamaadoitettuun (tai vastaavalla tavalla suojattuun) osaan tapahtuvassa maasulussa sekä lisäksi yli 1000 V järjestelmissä myös muussa äärijohtimen maasulussa, jossa vikaresistanssi on enintään 500 Ω , jos maasulku voi tapahtua myös muuhun kuin suojamaadoitettuun kohteeseen, kuten ilmajohdossa. On kuitenkin suositeltavaa, että maasulun hälytys- tai erotuslaite toimii vielä mainitun rajan yli niin suureen vikaresistanssiin saakka kuin teknillisesti käy kohtuudella päinsä. Erityisesti suositellaan maasulun erotuslaitteen täydennykseksi ainakin hälyttävää varasuojaa, joka toimii mahdollisimman suureen vikaresistanssiin saakka.”* Maasulkusuojalaitteen ei vaadita toimivan johdinkatkeaman yhteydessä maasulun sijaitessa katkeaman ja kuorman välillä.

Sähkölaitos on varustettava kaksoismaasulun itsetoimivasti ja nopeasti poiskytkävillä laitteilla silloin, kun vaaditaan yksivaiheisen maasulun hälytys- tai erotuslaitteiden toimintaa. Vaatimus on täytettävissä tavanomaisilla ylivirtasuojilla vain, mikäli kaikille suojamaadoitettaville osille käytetään yhteistä maadoituselektrodia [Pirtilä]. Vaatimus voidaan toteuttaa oikosulkusuojalla, mikäli suojamaadoittaminen on tehty niin, että vikavirta on kaikissa tapauksissa riittävä oikosulkusuojan toimimiselle. Tällöin edellytetään kolmivaihejärjestelmässä, että releiden ollessa kaikissa vaiheissa, ei virtamuuntajien toisioon ole kytketty liian suurta impedanssia virran nollakomponentin kanalta. Kaksinapaisessa releistyksessä releiden tulee olla samoissa vaiheissa jokaisella johtolähdöllä. Yksivaiheisen maasulun erotuslaitetta käytettäessä on varmistuttava, että suoja toimii kaksoismaasulussa, sillä järjestelmän nollajännite on kaksoismaasulussa usein pienempi kuin yksivaiheisessa maasulussa. [Sähköturvallisuusmääräykset A1-93 1993]

4 OIKO- JA MAASULKUVIAT

Kansainvälinen standardi IEC 60909 määrittelee oikosulun tilanteena, jossa muodostuu johtava yhteys kahden tai useamman johtavan osan välille, minkä seurauksena potentiaalierot näiden johtavien osien välillä pienenevät lähes tai täysin nollan suuruisiksi [IEC 60909 2001, s.17]. Erään määritelmän mukaan oikosulku on tilanne, jossa käyttötaajuinen virta nousee vähintään kertaluokkaa suuremmaksi laitteiston nimellisvirtaan nähden eristysvastuksen laskiessa merkittävästi. Tämä määritelmä on peräisin INSKO:n julkaisusta Oikosulkukysymykset, jossa käsitellään nimenomaan oikosulkua eikä niinkään maasulkua. Oikosuluista aiheutuville vikavirroilla on keskeinen merkitys varsinkin teollisuuden sähköjakeluverkkojen suunnittelussa, mitoituksessa ja käytössä. Johtojen pituudet ovat lyhyitä, ja verkkoon liittyvät suuritehoiset tahtikoneet sekä lukuisat sähkömoottorit kasvattavat oikosulkuvirtoja varsinkin oikosulun alkuhetkellä. Myös vian alkamishetki virran sinikäyrän eri kohdassa vaikuttaa oikosulkuvirran suuruuteen oikosulun alussa. Suuri oikosulkuvirta aiheuttaa vaaraa laitteistoille ja henkilöturvallisuudelle. Suojauksen tulee aina poiskytkä oikosulku tarpeeksi nopeasti. Oikosulkuvaikutusten teoreettinen tarkastelu tapahtuu oikosulkuvirtaa käyttäen. Myös termiä oikosulku-teho käytetään, muttei niinkään laskennassa. [Oikosulkukysymykset 1973; Huotari 1998]

Vaiheen ja maan välisessä oikosulussa on kyse maasulusta. Verkon maadoituksesta riippuvat maasulussa ilmenevät maasulkuvirrat ja siihen liittyvät jännitteet. Maasulkuvirran jäädessä pieneksi ei sitä tarvitse välttämättä poiskytkä itsetoimivasti, mikäli kosketusjännitteiden katsotaan pysyvän riittävän pieninä. Suojauksen tulee aina kuitenkin tunnistaa maasulku, jotta se voidaan pois kytkeä käsin. Kun järjestelmän eri kohtiin syntyy kahdessa vaiheessa maasulku, on kyseessä kaksoismaasulku, joka suojauksen tulee poiskytkä automaattisesti. [SFS 6001+A1+A2 2009]

Oiko- ja maasulku eroavat vikavirroiltaan toisistaan, mutta esimerkiksi niiden aiheutumissyynä ovat usein yhteisiä. Monessa kirjallisuuslähteessä puhutaan oikosulusta, joka voi tarkoittaa sekä oikosulkua että maasulkua. Tässä työssä puhutaan oikosulkuviasta, kun tarkoitetaan joko oiko- tai maasulkua. Oikosulkuvikoja on vaihtelevia vaiheiden ja maan kytketymisen mukaan, mikä määrää vikavirtapiirin. Virtapiiriin voi liittyä esimerkiksi valokaaren vaikutuksesta myös vikaimpedanssia, joka huomioidaan vikaresistanssina R_f .

4.1 Aiheuttajat

Oikosulkuvika aiheutuu sähkölaitteiston jännitteisten osien eristyksen toimimattomuudesta tai laitteiston jonkin komponentin jännitekestoisuuden ylittyessä muuten. Vikaan

johtavat syyt voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: eristyksen pettäminen, ylijännitteet ja virheelliset käyttötoimenpiteet. Ensiksi mainittuun johtaa ilmaeristeisissä rakenteissa sinne kuulumattomien esineiden joutuminen tai eristimien likaantumisesta ja kostumuksesta johtuva eristystason heikkeneminen. Kiinteiden eristysrakenteiden, kuten kaapeliin tapauksessa vian voi aiheuttaa eristyksen mekaaninen rikkoutuminen ulkopuolisen voiman vaikutuksesta esimerkiksi kaivinkoneen osuessa kaapeliin. Kaapelin eristys voi vaurioitua myös eristysmateriaalin vanhenemisen, olosuhteiden ja osittaispurkausten yhteisvaikutuksesta päättyen lopulta läpilyöntiin.

Oikosulkuvikaan johtava ylijännite on tavallisesti ilmastollista alkuperää oleva jyrkkä transienttiylijännite, joka syntyy salaman suorasta tai epäsuorasta iskusta, jolloin ylijännite kulkeutuu syöksyaaltona johtavia rakenteita pitkin sähkölaitteistoon. Pientaajuinen ylijännite, josta käytettiin aikaisemmin nimitystä käyttötaajuinen ylijännite, aiheuttaa harvemmin oikosulkua. Pientaajuisia ylijännitteitä voi aiheutua maasulusta, kuorman irtikytkennästä, pitkän johdon tyhjäkäynnistä, verkon resonansseista ja ferroresonansseista, vajaanapaisesta toiminnasta tai katkoksesta sekä generaattoreiden itseherätyksestä. Olipa perimmäinen syy ylijännitteeseen mikä tahansa edellä luetelluista, aiheuttaa se usein ensin maasulun, josta voi lopulta kehittyä oikosulku.

Merkittävä oikosulkuvikojen aiheuttaja on virheelliset käyttötoimenpiteet, jotka ilmenevät tavallisesti inhimillisenä erehdyksenä erilaisissa kytkentätilanteissa. Näitä ovat muun muassa jännitteen ennenaikainen kytkeminen työmaadoitettuun tai muulla tavoin keskeneräiseen laitteistoon, virran kytkeminen tai katkaisu siihen kykenemättömällä kytkinlaitteella ja virheellinen tahdistus. [Oikosulkukysymykset 1973; Aro 2011]

Teollisuusverkon vikoja ja vikojen aiheuttajia kuvastaa Kaukopään tehtailla tehty selvitys vuosien 1970–1984 aikana ilmenneistä vioista 10 kV kojeistoissa ja kaapeleissa. Yhteensä 23 viasta 15 oli maasulkuja, joista seitsemän kehittyi oikosuluksi. Oikosulkuna heti ilmenneitä vikoja oli kuusi ja loput kaksi vikaa oli listattu muuksi viaksi. Oikosuluksi kehittyneen maasulun kesto aika vaihteli muutamista sekunneista peräti 15 minuuttiin. Laukaiseva maasulkusuojaus olisi estänyt yhden oikosulun, jossa vaurioitui kolme kenttää kojeistosta. Vikoihin johtaneet syyt jakautuivat seuraavasti: kaapelin eristyksen pettäminen 8 kpl, kaivinkone osui kaapeliin 3 kpl, muu kaapelivika 7 kpl, rotta kojeistossa 2 kpl ja katkaisijavika 1 kpl. [Teollisuuden sähköverkot 2 1985] Vaikka selvityksestä on jo aikaa, eivät teollisuuden keskijänniteverkot ole merkittävästi muuttuneet. Vioista merkittävä osuus alkaa kaapeleiden vaurioista, mitkä johtuvat pääasiassa kaapelien vanhenemisesta ja altistumisesta kuluttaville olosuhteille. Vika alkaa usein maasulkuna, joka kestoajan pidetessä kehittyy yhä todennäköisemmin oikosuluksi. Maasulun nopean laukaisun voidaan katsoa olevan yksi merkittävimmistä oikosulun ennaltaehkäisykeinoista.

4.2 Seuraukset

Oikosulun seurauksena on vähintäänkin sähkön käyttöhäiriö. Maasulusta ei välttämättä aiheudu välitöntä käyttöhäiriötä, jos maasulku sammuu itsestään. Maasta erotetussa

verkossa voidaan käyttöä jatkaa maasulun aikana tietyin ehdoin, jolloin katko voidaan siirtää käytön kannalta edullisempaan ajankohtaan. Vian poistamiseksi katkaisija erottaa viallisen osan syöttävästä verkosta katkaisten vikavirran. Vian aiheuttajasta ja vaikutusajasta riippuu, voidaanko käyttöä jatkaa saman tien vai joudutaanko ryhtymään korjaustoihin. Verkon rakenne määrää, saadaanko normaalista syöttösuunnasta katsoen vikapaikan takana olevalle verkolle sähkön jakelu korvaavaa yhteyttä käyttäen vian korjaamisen ajaksi. Oikosulkuvika aiheuttaa myös jonkin asteisen jänniteheilahduksen verkkoon, joka saattaa näkyä kuormituksessa. Varsinkin prosessiteollisuuden laitteet, kuten moottorikäytöt häiriintyvät herkästi. Välittömiä ja ensisijaisia oikosulun vaikutuksia ovat vikapaikalla ja vikavirtapiirin välittömässä yhteydessä esiintyvät oikosulkuvirran dynaamiset ja termiset vaikutukset. Näiden lisäksi vikapaikalla esiintyy valokaarivian yhteydessä valokaaren vaikutukset. [Oikosulkukysymykset 1973; Teollisuuden sähköverkot 2 1985]

Dynaamiset eli mekaaniset vaikutukset aiheutuvat oikosulkuvirran sisältämistä sysäysvoimista, jotka rasittavat johtimia, tukieristimiä, kaapelivarusteita ja käämityksiä, ja jotka pyrkivät avaamaan kytkinlaitteiden koskettimia. Dynaaminen voima on suurimmillaan oikosulkuvirran alkuhetkillä virran saavuttaessa suurimman hetkellisen arvon. Termiset eli lämmittävät vaikutukset aiheutuvat oikosulkuimpedansseissa syntyvistä virtahäviöistä, jotka aiheuttavat virtapiirin osien nopean lämpenemisen. Lämpeneminen on verrannollinen oikosulkuvirran neliön integraaliin, ja aiheuttaa johtimissa lämpenemisen lisäksi lämpölaajenemista sekä eristyksen haitallista lämpenemistä. Oikosulkuun liittyy usein vikapaikassa palava valokaari, jonka suurimmat vaarat liittyvät poltto- ja painevaikutuksiin. Valokaari synnyttää myös suuren lämpösäteilyn. Lämpötila voi nousta niin suureksi, että johdinmateriaalina käytetyt metallit, alumiini ja kupari, höyrystyvät. Johdinmetallien ja eristeen palamisesta aiheutuu sulamistuotteiden roiskumista ympäristöön sekä myrkyllisiä savukaasuja. [Frantti 1989]

4.3 Vikatyypit

Standardi SFS 6001 käsittelee seuraavia oikosulkuvikatyyppejä:

- kolmivaiheinen oikosulku
- vaiheiden välinen oikosulku
- maasulku
- kaksoismaasulku.

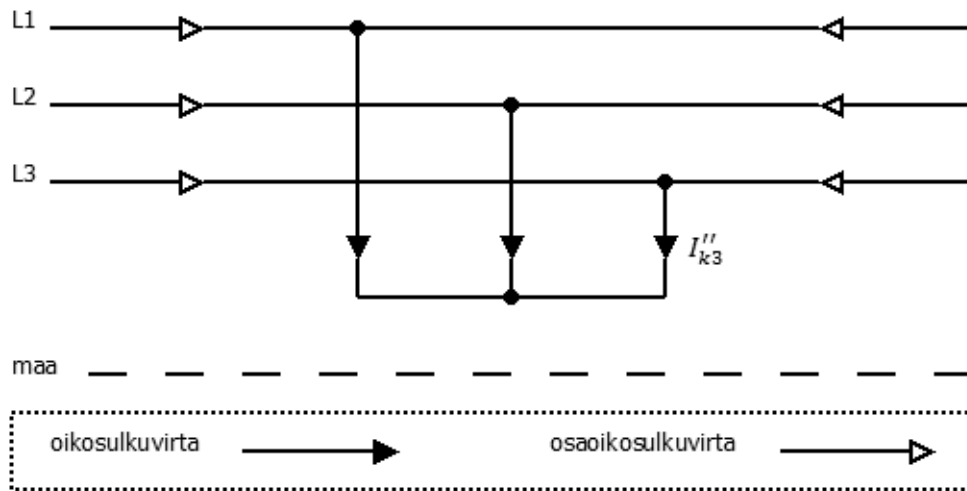
Verkon oiko- ja maasulkusuojauksen tulee toimia näissä vikatilanteissa. Vaiheiden välisiin oikosulkuihin voi liittyä myös maakosketus. Lisäksi oikosulkuviassa esiintyy usein vikaimpedanssi. Maakosketus ja vikaimpedanssi pienentävät vikavirtaa, mikä tulee huomioida suojauksessa määritettäessä pienintä vikavirtaa, jolla suojauksen tulisi toimia.

Lisäksi muuntajissa ja moottoreissa voi esiintyä pienempiä sisäisiä vikoja kuten kierrossulkuja. Kaapeleissa ja johdoissa voi sattua johdinkatkeama, joka ei välttämättä aiheuta maasulkua syöttävän verkon puolella. Näitä vikoja verkon oiko- ja maasul-

kusuojaus ei välttämättä pysty tunnistamaan, joten näitä varten tulee tapauskohtaisesti laitteen, käytön ja turvallisuuden mukaan suojautua. Työssä keskitytään standardin määrittelemiin vikatilanteisiin. [Sähköturvallisuusmääräykset A1-93 1993; SFS 6001+A1+A2 2009]

4.3.1 Kolmivaiheinen oikosulku

Kolmivaiheinen oikosulku muodostaa vikatyypin perustapauksen, koska se aiheuttaa usein suurimman vikavirran, mikä toimii määräävänä tekijänä verkon mitoituksessa. Kolmivaiheisessa oikosulussa kaikki kolme vaihetta sulkeutuu yhteen, jolloin vikapaikan jännitteet ovat nollia, ja kaikki vaiheet syöttävät symmetrisesti vikavirtaa. Tilannetta havainnollistaa kuva 4.1, jossa ilmenee kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta I''_{k3} .

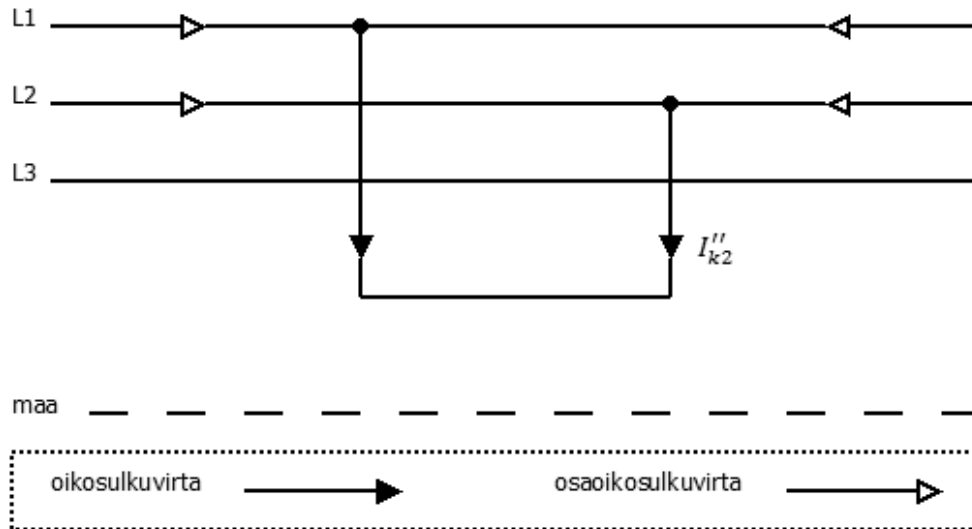


4.1 Kolmivaiheinen oikosulku mielivaltaisesti valituilla virtojen suunnilla. [IEC 60909 2001]

Symmetriasta johtuen, vaiheiden välinen vaihe-ero säilyy 120 asteen suuruisena, liittyykö oikosulkutilanteeseen maakosketusta tai ei. Muut oikosulkuviat ovat luonteeltaan epäsymmetrisiä, mikä tekee niiden tarkastelusta monimutkaisempaa. [Frantti 1989; Salminen 2008]

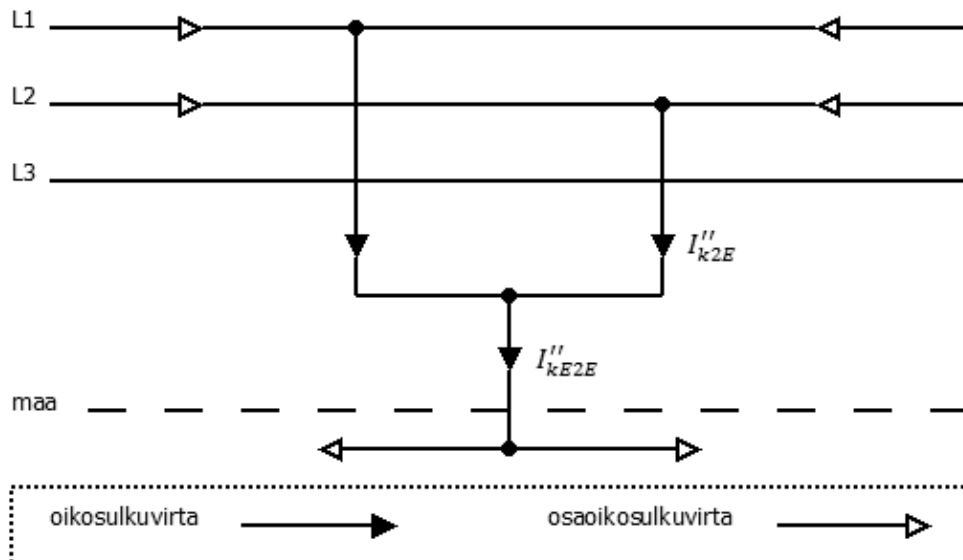
4.3.2 Kaksivaiheinen oikosulku

Kaksivaiheisessa oikosulussa kaksi vaihetta kytkeytyy vikapaikassa yhteen, jolloin vaiheiden jännitteet ovat nollia, mikäli vikaimpedanssia ei esiinny. Kaksivaiheinen oikosulku ja kaksivaiheinen alkuoikosulkuvirta I''_{k2} on esitetty kuvassa 4.2.



Kuva 4.2 Kaksivaiheinen oikosulku, kun virtojen suunnat on valittu mielivaltaisesti. [IEC 60909 2001]

Kaksivaiheinen oikosulkuvirta on lähes aina pienempi kuin kolmivaiheinen oikosulkuvirta. Ainoastaan tahtikoneen läheisyydessä on mahdollista, että kaksivaiheinen oikosulkuvirta kasvaa suuremmaksi. Tällöin sen arvo voi olla pysyvässä tilassa enimmillään noin 1,4-kertainen kolmivaiheiseen oikosulkuvirtaan nähden. Suojauksen tulisi kuitenkin toimia ennen pysyvää tilaa, joten yleisesti kaksivaiheinen oikosulkuvirta jää kolmivaiheista pienemmäksi. Mikäli kaksivaiheiseen oikosulkuun liittyy maakosketus, pienentää se usein vielä oikosulkuvirtaa. Tilanteeseen vaikuttavat verkon impedanssit ja mahdollinen vikaresistanssi. Maaoikosulussa, jossa kaksivaiheiseen oikosulkuun liittyy maakosketus, on tilanne kuvan 4.3 mukainen.



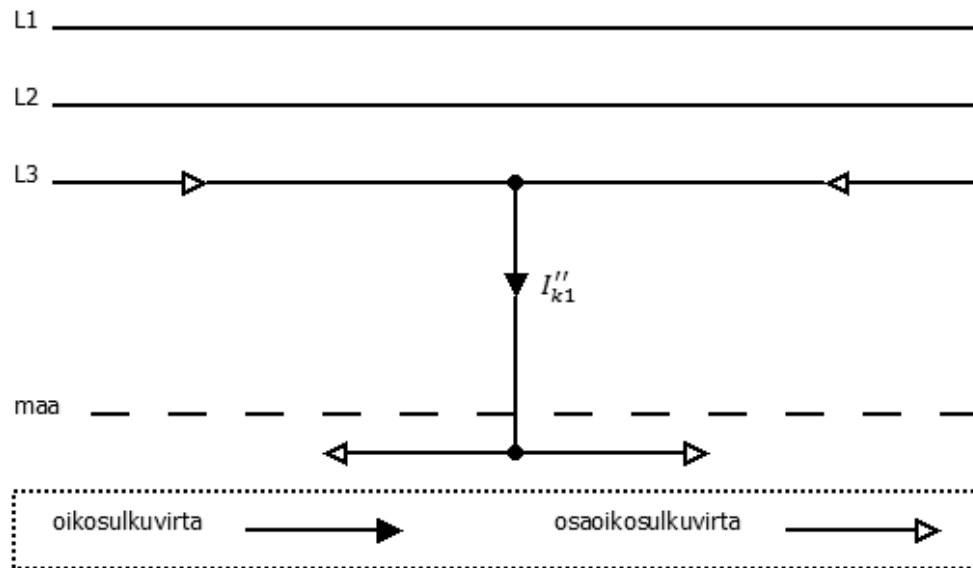
Kuva 4.3 Kaksivaiheinen oikosulku maakosketuksella, kun virtojen suunnat on valittu mielivaltaisesti. I'_{k2E} on vaiheessa kulkeva alkuoikosulkuvirta ja I''_{kE2E} on maahan menevä alkuoikosulkuvirta. [IEC 60909 2001]

Maasta erotetussa tai kompensoidussa verkossa kaksivaiheinen oikosulku tuottaa pienimmän oikosulkuvirran, joka oikosulkusuojauksen on tunnistettava ja itsetoimivasti

irtikytettävä. Maakosketus ja vikaimpedanssi tulee huomioida pienimmän oikosulkuvirran laskemisessa. [Teollisuuden sähköverkot 2 1985; Salminen 2008]

4.3.3 Maasulku

Maasulussa vaihejohtimen ja maan tai maahan yhteydessä olevan osan välille muodostuu johtava yhteys joko galvaanisesti tai valokaaren välityksellä. Täydessä maasulussa vikaantuneen vaiheen jännite putoaa nollaan ja maasulkupiiri sulkeutuu verkon tähtipisteen kautta. Maasulku on esitetty kuvassa 4.4, jossa yksivaiheinen alkuoikosulkuvirta I''_{k1} kulkeutuu maahan.

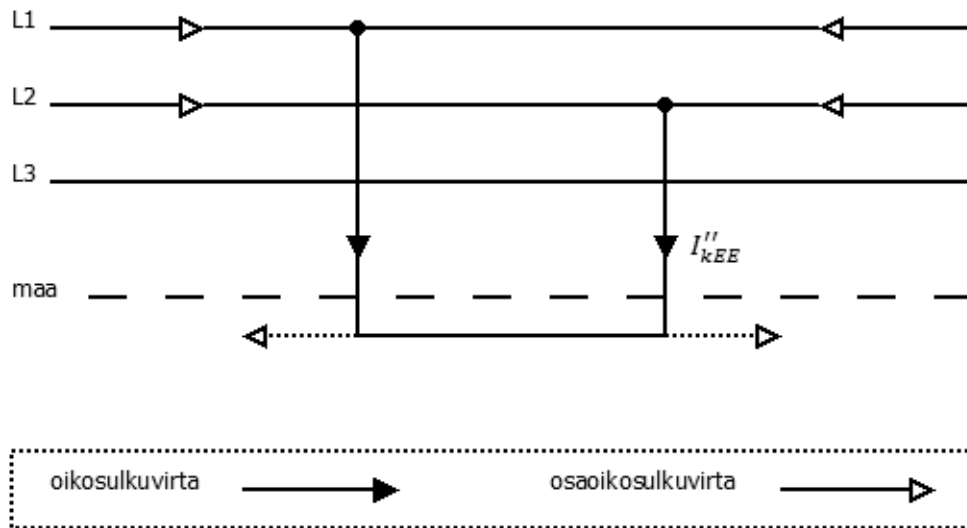


Kuva 4.4 Maasulku, jossa virtojen suunnat on valittu mielivaltaisesti. [IEC 60909 2001]

Maahan kulkeva virta vaihtelee merkittävästi verkon maadoitustavan mukaan. Suoraan maadoitetussa verkossa tapahtuvaa yksivaiheista vikaa kutsutaankin yksivaiheiseksi oikosuluksi, jossa sen oikosulkuvirta on niin suuri, että se täytyy kytkeä automaattisesti pois. Muihin oikosulkuvirtoihin nähden yksivaiheinen oikosulku tuottaa useimmiten pienimmän verkossa esiintyvän oikosulkuvirran. Maasta erotetussa tai sammutetussa verkossa maasulkuvirta jää huomattavasti oikosulkuvirtoja ja yleensä kuormitusvirtaakin pienemmäksi. Yksivaiheisen maasulun vikavirta jää usein laitteiston kannalta vaarattoman pieneksi, mutta sen sijaan verkon jännitteet voivat aiheuttaa vaaraa verkon laitteille. Maasulun aiheuttama nollajännitteen nousu aiheuttaa vaaran henkilöturvallisuudelle vikapaikan läheisyydessä. [Teollisuuden sähköverkot 2 1985]

4.3.4 Kaksoismaasulku

Kahden tai useamman vaiheen maasulussa järjestelmän eri kohdissa on kyse kaksois- tai monivaiheisesta maasulusta [SFS 6001+A1+A2 2009]. Tällöin vaiheet kytkeytyvät yhteen vikapaikkojen välisen maan välityksellä. Tilanteessa esiintyvät kiertävä oikosulkuvirta ja maasulkuvirta kuvassa 4.5.



Kuva 4.5 Kaksoismaasulku, jossa vaiheiden välillä kiertää alkuoikosulkuvirta I''_{KEE} , jonka lisäksi osa vikavirrasta kulkeutuu maasulkuvirtana verkon tähtipisteen kautta.

Kaksoismaasulun vaiheiden välillä kiertävä oikosulkuvirta on suuruudeltaan kaksivaiheisen oikosulkuvirran luokkaa. Maahan kulkeva osa vikavirrasta jää yleensä yksivaiheista maasulkuvirtaa pienemmäksi. Tilanteeseen vaikuttaa maasulkukohtien vikaimpedanssit, maadoitukset sekä vikapaikkojen sijainti. [Mörsky 1992]

4.4 Oikosulkuvirta – ja suureet

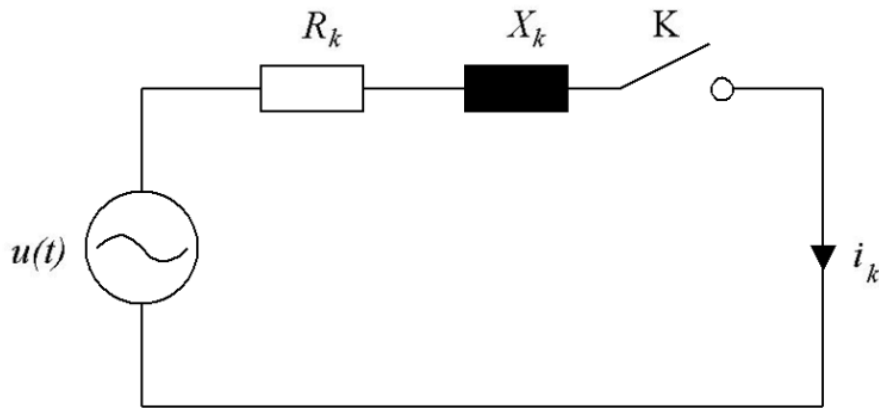
Oikosulkuvirran perusluonteen selvittämiseksi riittää yksinkertaisen tilanteen tarkastelu. Syöttävän verkon jännitelähteeksi valitaan ideaalinen sinimuotoinen jännite

$$u(t) = \hat{u} \sin(\omega t + \alpha), \quad (1)$$

missä \hat{u} on sinimuotoisen jännitteen huippuarvo, ω on kulmataajuus, t on kulunut aika oikosulkuhetkestä alkaen ja α on jännitteen vaihekulma nollakohdasta laskettuna oikosulun alkuhetkellä. Vikavastuksettoman oikosulun syntyessä verkon resistanssin ja reaktanssin aikaansaamien jännitehäviöiden summan on oltava sama kuin syöttävän verkon jännite. Tällöin yhtälö (1) voidaan johtaa muotoon

$$R_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt} = \hat{u} \sin(\omega t + \alpha), \quad (2)$$

missä R_k on piirin oikosulkuresistanssi, i_k oikosulkuvirta ja L_k oikosulkuinduktanssi. Kuvassa 4.6 on esitetty kolmivaiheverkon yksivaiheinen sijaiskytkentä ilman kuormitusta, ja oikosulun syntymistä kuvaa tilanne, jossa kytkin K sulkeutuu.



Kuva 4.6 Oikosulkupiirin yksivaiheinen sijaistykentä ilman kuormitusta, missä X_k on piirin oikosulkureaktanssi. [Oikosulkukysymykset 1973]

Edelleen yhtälöstä (2) saadaan ratkaistua oikosulkuvirta ajan hetkellä t

$$i_k(t) = \frac{\hat{u}}{Z_k} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha - \varphi_k) \right], \quad (3)$$

missä Z_k on oikosulkupiirin vaiheimpedanssi, φ_k impedanssin vaihekulma ja τ piirin aikavakio. Nämä voidaan esittää piirin resistanssin ja reaktanssin avulla yhtälöillä (4-6). [Oikosulkukysymykset 1973]

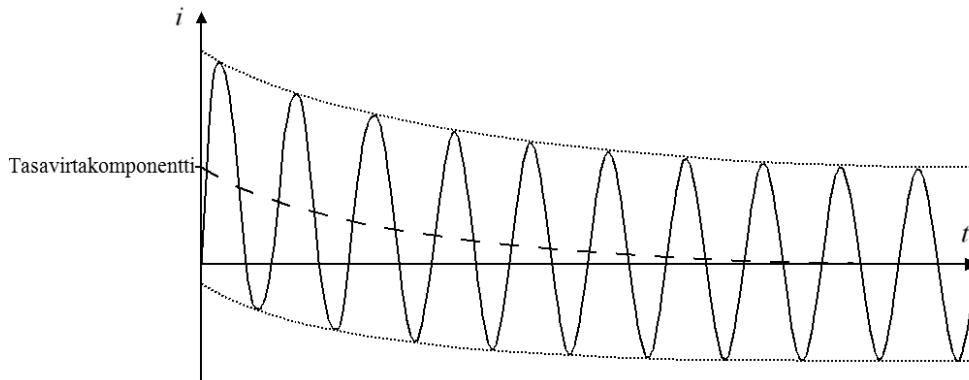
$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \quad (4)$$

$$\varphi_k = \arctan\left(\frac{X_k}{R_k}\right) \quad (5)$$

$$\tau = \frac{X_k}{\omega R_k} = \frac{L_k}{R_k} \quad (6)$$

4.4.1 Oikosulkuvirran komponentit ja vaimeneminen

Oikosulkuvirta muodostuu vaihtovirta- ja tasavirtakomponenteista. Yhtälössä (3) esiintyy kaksi sinimuotoista termiä, joista ensimmäinen, $\sin(\omega t + \alpha - \varphi_k)$, on oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti ja jälkimmäinen, $-e^{-t/\tau} \sin(\alpha - \varphi_k)$, tasavirtakomponentti. Vaihtovirtakomponenttia kuvaa symmetrinen siniaaltoyhtälö. Tasavirtakomponentin suuruuden määrää oikosulun syntyhetki. Syntyhetkellä $\alpha - \varphi_k = 0^\circ$ tai 180° tasavirtakomponenttia ei ilmene laisinkaan. Tällöin kyseisen vaiheen oikosulkuvirta on täysin symmetrinen. Oikosulun syntyessä muuna ajan hetkenä esiintyy sen virrassa tasakomponentti, jolloin virta on epäsymmetrinen. Tasavirtakomponentti saa suurimman alkuarvonsa oikosulun alkuhetkellä $\alpha - \varphi_k = \pm 90^\circ$, jolloin oikosulkuvirta ilmenee kaikkein epäsymmetrisimpänä. Kuvassa 4.7 on esitetty epäsymmetrisin tilanne ja tasavirtakomponentin käyttäytyminen.



Kuva 4.7 Epäsymmetrinen oikosulkuvirta ja sen tasavirtakomponentti. [IEC 60909 2001]

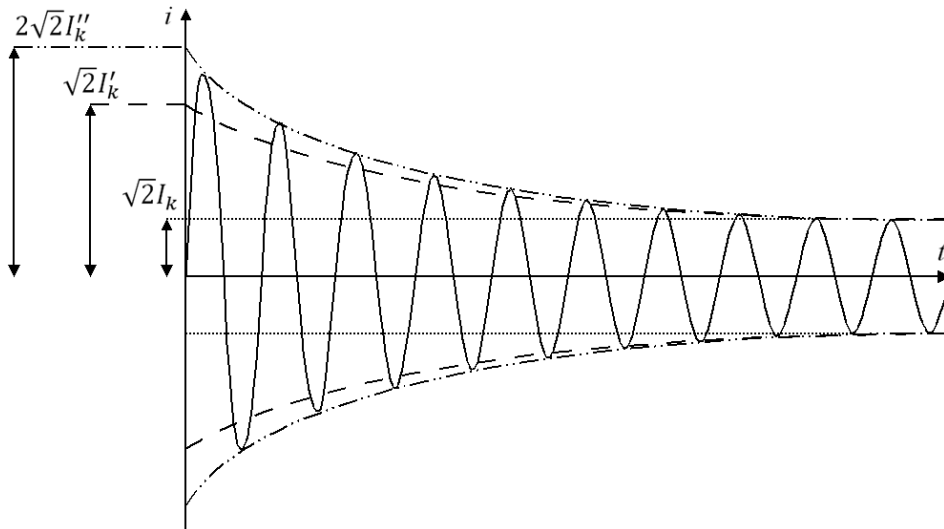
Huomioitakoon, että tarkasteltavan vaiheen oikosulkuvirran ollessa symmetrinen ovat vuorostaan muiden vaiheiden oikosulkuvirrat epäsymmetrisiä johtuen vaiheiden välisestä $\pm 120^\circ$ vaihe-erosta. [Oikosulkukysymykset 1973; Huotari 1998]

Kuten kuvasta 4.7 näemme, tasavirtakomponentti alkaa heti vaimentua eksponentiaalisesti aikavakion τ suhteen. Aikavakio τ riippuu yhtälön (6) mukaisesti verkon reaktanssin ja resistanssin suhteesta. Tämä pätee yksinkertaistetussa mallissa, jossa verkon impedanssit eivät muutu oikosulun aikana. Todellisessa verkossa impedanssi voi muuttua varsinkin tahtikoneen läheisyydessä. Tämä johtuu tahtikoneen sisäisistä reaktanssimuutoksista oikosulun aikana. Mitä lähempänä tahtikoneetta oikosulku sattuu, sitä suurempi on tahtikoneen syöttämän oikosulkuvirran osuus ja sen myötä tahtikoneen vaikutus tasavirtakomponenttiin. Kun kuvan 4.6 verkon impedanssissa Z_k vaikuttavat myös tahtikoneen muuttuvat reaktanssit, saadaan aikavakio laskettua kaavasta

$$\tau = \frac{X_d'' + X_n}{\omega(R_d + R_n)}, \quad (7)$$

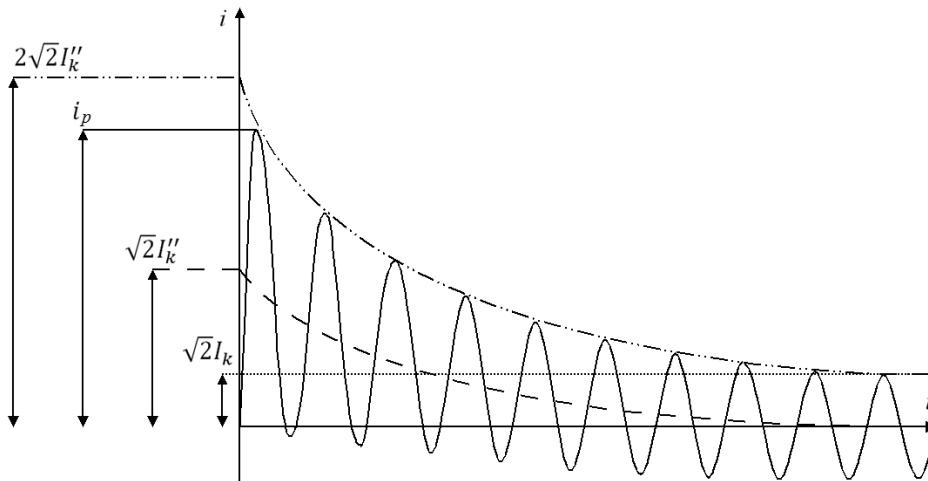
missä X_d'' on generaattorin alkureaktanssi, X_n generaattorin ja vikapaikan välinen reaktanssi, R_d generaattorin resistanssi, R_n generaattorin ja vikapaikan välinen resistanssi ja ω kulmataajuus. [Oikosulkukysymykset 1973]

Kun merkittävä osa oikosulkuvirrasta syötetään tahti- tai epätahtikoneilla, niin myös vaihtovirtakomponentti vaimenee. Tämä selittyy sähkökoneen sisäisen impedanssin kasvamisesta oikosulun aikana. Oikosulkuvirran tiettyinä ajan hetkinä puhutaan alkuoikosulkuvirrasta I_k'' , muutosoikosulkuvirrasta I_k' , jatkuvan tilan oikosulkuvirrasta I_k ja sysäysoikosulkuvirrasta i_p , jotka määritellään tarkemmin luvuissa 4.42 ja 4.43. Kuvassa 4.8 on havainnollistettu vaihtovirtakomponentin vaimeneminen selkeimmillään symmetrisessä tilanteessa. [Huotari 1998; Salminen 2008]



Kuva 4.8 Tahtigeneraattorin syöttämä symmetrinen oikosulkuvirta oikosulun syntyhetkellä $\alpha - \varphi_k = 0^\circ$ tai 180° . [Huotari 1998]

Kuvan 4.8 tilanteessa ei siis esiinny tasavirtakomponenttia, mutta sen sijaan alkuhetkellä suurimmillaan oleva vaihtovirtakomponentti vaimenee alkutilasta pysyvään tilaan asti. Sen sijaan kuvan 4.9 tilanteessa esiintyy epäsymmetrinen oikosulkuvirta, jossa ilmenevät sekä tasa- että vaihtovirtakomponentit ja niiden vaimeneminen.



Kuva 4.9 Tahtigeneraattorin syöttämä epäsymmetrinen oikosulkuvirta. [Huotari 1998]

Kun kuvan 4.6 sijaiskytkennän reaktanssissa X_k on huomioitu tahtikone ja muut verkon reaktanssit, voidaan oikosulkuvirralla esittää yhtälö

$$i(t) = \sqrt{2} \left[(I''_k - I'_k) e^{-\frac{t}{\tau''}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + (I'_k - I_k) e^{-\frac{t}{\tau'}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + I_k \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + I''_k e^{-\frac{t}{\tau''}} \sin(\alpha - \varphi_k) \right], \quad (8)$$

missä τ'' on oikosulkuvirran alkuaikavakio ja τ' muutosaikavakio. Oikosulkuvirtojen I''_k , I'_k ja I_k arvot ovat niiden alkuhetkeen ekstrapoloidut tehollisarvot, jotka voidaan laskea seuraavilla yhtälöillä

$$I''_k = \frac{E''}{\sqrt{(R_d + R_n)^2 + (X''_d + X_n)^2}}, \quad (9)$$

$$I'_k = \frac{E'}{\sqrt{(R_d + R_n)^2 + (X'_d + X_n)^2}}, \quad (10)$$

$$I_k = \frac{E}{\sqrt{(R_d + R_n)^2 + (X_d + X_n)^2}}, \quad (11)$$

missä E'' on generaattorin alkutilan sähkömotorinen voima, E' generaattorin muutostilan sähkömotorinen voima, E generaattorin pysyvän tilan sähkömotorinen voima, X''_d generaattorin alkureaktanssi, X'_d generaattorin muutosreaktanssi, X_d generaattorin pysyvän tilan reaktanssi, R_d generaattorin resistanssi, R_n generaattorin ja vikapaikan välinen resistanssi ja X_n generaattorin ja vikapaikan välinen reaktanssi. Generaattorin sähkömotorisiin voimiin E'' , E' ja E vaikuttaa oikosulkua edeltävä kuormitusvirta, jolloin

$$\underline{E}'' = \underline{U}_{ng} + jX''_d \underline{I}, \quad (12)$$

$$\underline{E}' = \underline{U}_{ng} + jX'_d \underline{I}, \quad (13)$$

$$\underline{E} = \underline{U}_{ng} + jX_d \underline{I}, \quad (14)$$

missä \underline{U}_{ng} on tahtikoneen nimellinen vaihejännite ja \underline{I} tahtikoneen kuormitusvirta ennen oikosulkua. Generaattorin tyhjäkäydessä pätee

$$E'' = E' = E = \frac{U_{ng}}{\sqrt{3}}. \quad (15)$$

Vaihtovirtakomponentin aikavakiot määräytyvät seuraavista yhtälöistä

$$\tau'' = \frac{X''_d + X_n}{X'_d + X_n} \tau''_{d0}, \quad (16)$$

$$\tau' = \frac{X'_d + X_n}{X_d + X_n} \tau'_{d0}, \quad (17)$$

missä τ''_{d0} on tyhjäkäyntitilan alkuaiikavakio ja τ'_{d0} muutosaiikavakio. Generaattorin läheisyydessä tapahtuvassa oikosulussa oikosulkuvirran vaihtokomponentti vaimenee eksponentiaalisesti aikavakioilla τ'' ja τ' pysyvään tilaan. [Huotari 1998]

4.4.2 Alku-, muutos- ja jatkuva oikosulkuvirta

Verkon suojauksen ja mitoituksen tarkastelemisessa tarvitaan tiettyjä oikosulkusuureita. Alkuoikosulkuvirta I''_k on vaihtovirtakomponentin tehollisarvo oikosulun syntyhetkellä, josta se vaimenee nopeasti. Tämän vuoksi alkuoikosulkuvirtaa ei ensisijaisesti käytetä suoraan varsinkaan mitoituksen perusteena, koska tällöin päädyttäisiin usein ylimitoitukseen. Sitä käytetään sen sijaan muiden oikosulkusuureiden määrittämiseen ja sen perusteella voi muodostaa yleiskuvan verkosta ja sen oikosulkuvirroista.

Muutostilan oikosulkuvirta I'_k on vaihtovirtakomponentin tehollisarvo oikosulun alkuhetken ja pysyvän tilan välisessä muutostilassa. Muutostilassa oikosulkuvirta vaimenee saavuttaen lopulta pysyvän tilan. Oikosulkusuojaus toimii kuitenkin yleensä aina muutostilan aikana ja suojauksen toiminnan aikaista virtaa nimitetään katkaisuvirraksi.

Pysyvä eli jatkuva tila saavutetaan, kun kaikki muutosilmiöt ovat vaimentuneet, jolloin oikosulkuvirtaa kutsutaan pysyvän tilan oikosulkuvirraksi I_k . Toisin kuin alkuoi-

koskuvirran laskeminen, pysyvän tilan virran laskeminen riippuu monista muuttujista, ja on täten hankalaa. Muuttujia ovat muun muassa tahtikoneiden magnetoinnit, generaattoreiden ja muuntajien automaattiset jännitteen säädöt sekä verkon muutoskytkennät oikosulun aikana. Sen sijaan epätahtikoneilla ei ole vaikutusta. Verkon mitoittamiseen riittää yleensä pysyvän tilan suurimman mahdollisen oikosukuvirran arvioiminen oikosukukestoisuuden täyttämiseksi. Suojauksen kannalta pysyvän tilan pienintä arvoa ei tarvita, koska suojauksen on tarkoitus toimia ennen sitä. [Huotari 1998; IEC 60909 2001; Salminen 2008]

4.4.3 Sysäysoikosukuvirta i_p

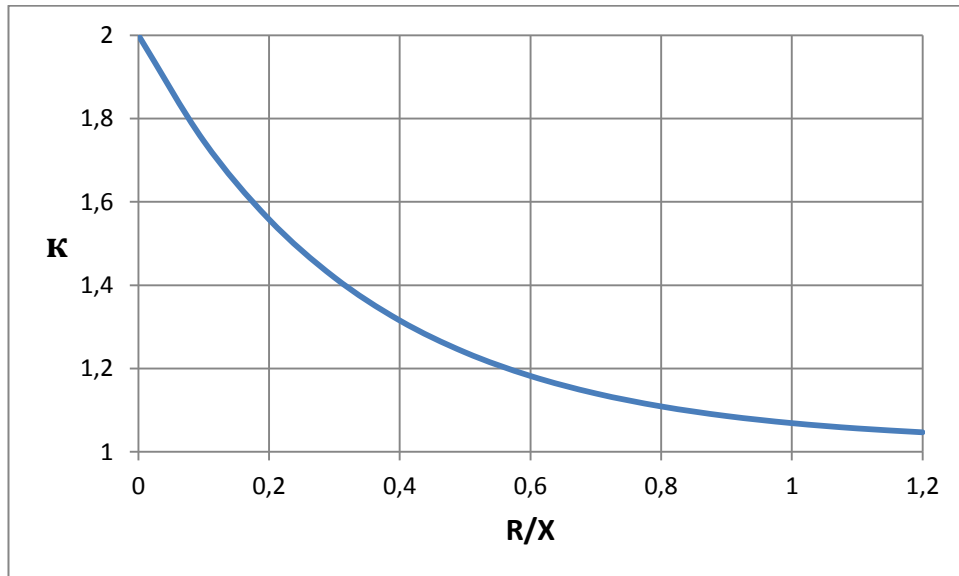
Suurin oikosukuvirran hetkellisarvo ilmenee noin 10 ms oikosulun syntyhetkestä, ja tämä arvo on sysäysoikosukuvirta. Sitä kutsutaan myös dynaamiseksi oikosukuvirraksi, jonka voimavaikutukset tulee huomioida sähkölaitteiston mekaanisessa mitoituksessa. [Huotari 1998] Sysäysoikosukuvirran suuruuteen vaikuttaa oikosulun syntyhetki, sitä edeltävä verkon kuormitustilanne ja varsinkin verkon pyörivät tahti- ja epätahtikoneet, jotka voivat kasvattaa oikosukuvirtaa jopa 70 %. Sysäysoikosukuvirta voidaan laskea alkuoikosukuvirran tehollisarvon ja sysäyskertoimen κ avulla seuraavasti

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' . \quad (18)$$

Sysäyskerroin on riippuvainen oikosukupiirin resistanssin R ja reaktanssin X suhteesta

$$\kappa = 1,02 + 0,98 e^{-\frac{3R}{X}}, \quad (19)$$

mikä on myös esitetty kuvassa 4.10.



Kuva 4.10 Sysäyskertoimen κ riippuvuus verkon resistanssin R ja reaktanssin X suhteesta. [IEC 60909 2001]

Sysäyskertoimelle voidaan käyttää arvoa 1,8 suurjännitteellä, mikäli tarkkaa arvoa ei saada määriteltä [Huotari 1998, s. 24]. Säteilteisessä verkossa vikavirtaa syötettäessä usean haaran kautta summataan haaravirrat, jolloin

$$i_p = i_{p1} + i_{p2} + \dots + i_{pn} , \quad (20)$$

missä i_p on vikapaikan sysäysoikosulkuvirta ja $i_{p1}, i_{p2}, \dots, i_{pn}$ ovat eri haarojen sysäysoikosulkuvirrat. Silmukoidun verkon sysäysvirtatarkasteluihin on omat menetelmänsä, joita ei ole tarpeen käydä läpi tässä. Verkon suojaus on aina liian hidas estääkseen sysäysoikosulkuvirran vaikutuksia [Frantti 1989]. [IEC 60909 2001; Salminen 2008]

4.4.4 Katkaisuvirta I_b

Katkaisuvirralla tarkoitetaan katkaisijan läpi menevän symmetrisen oikosulkuvirran tehollisarvoa virran katkaisun alkaessa. Katkaisukertoimella μ huomioidaan oikosulkuvirran vaimeneminen katkaisuviiveen t_{min} aikana. Katkaisuviive käsittää oikosulun alkukhetken ja katkaisutapahtuman alun välisen ajan, joka koostuu suojausalueen kokonaistoiminta-ajasta ja katkaisijan toiminta-ajasta laukaisukäskystä koskettimien avautumiseen. Katkaisuviive ei huomioi suojausalueen aseteltavaa toimintahidastusta. Katkaisuvirta voidaan laskea yhtälöllä

$$I_b = \mu I_k'' \quad (21)$$

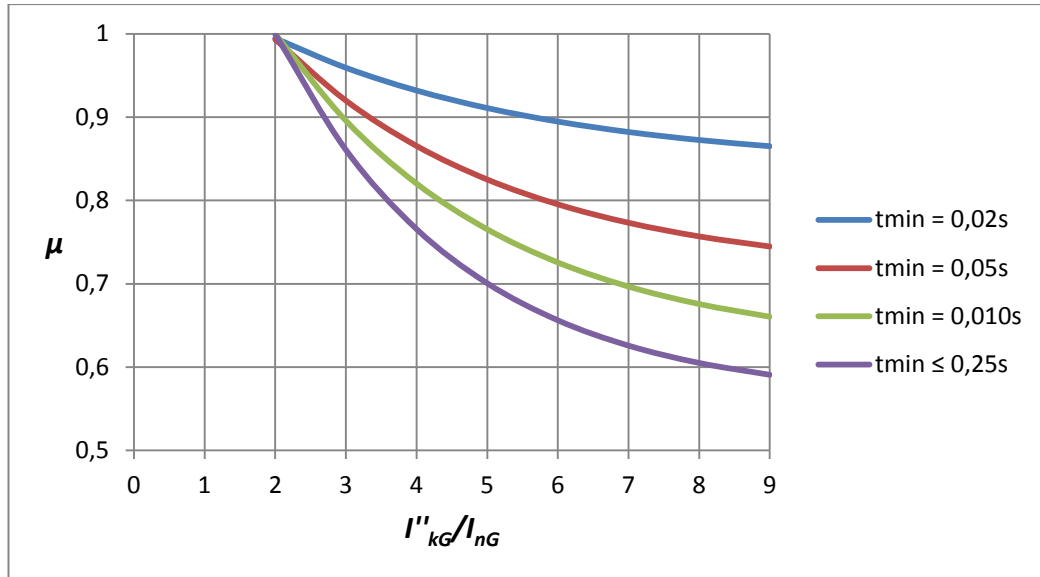
Tahtikoneen tapauksessa katkaisuvirtaan vaikuttaa katkaisukerroin, joka määräytyy katkaisuviiveen lisäksi tahtikoneen syöttämän alkuoikosulkuvirran I_{kG}'' ja nimellisvirran I_{nG} suhteesta. Katkaisukerroin voidaan määrittää kuvasta 4.11 tai seuraavien yhtälöiden avulla

$$\mu = 0,84 + 0,26e^{-0,26 \frac{I_{kG}''}{I_{nG}}}, \text{ kun } t_{min} = 0,02s, \quad (22)$$

$$\mu = 0,71 + 0,516e^{-0,30 \frac{I_{kG}''}{I_{nG}}}, \text{ kun } t_{min} = 0,05s, \quad (23)$$

$$\mu = 0,62 + 0,72e^{-0,32 \frac{I_{kG}''}{I_{nG}}}, \text{ kun } t_{min} = 0,10s, \quad (24)$$

$$\mu = 0,56 + 0,94e^{-0,38 \frac{I_{kG}''}{I_{nG}}}, \text{ kun } t_{min} \geq 0,25s. \quad (25)$$



Kuva 4.11. Tahtikoneen katkaisukerroin μ eri katkaisuviiveen t_{min} arvoilla tahtikoneen syöttämän alkuoikosulkuvirran I''_{kG} ja nimellisvirran I_{nG} suhteen. [IEC 60909 2001]

Suhteen I''_{kG}/I_{nG} ollessa pienempi tai yhtä suuri kuin kaksi, voidaan katkaisukertoimen arvona käyttää yhtä kaikilla katkaisuviiveen arvoilla. Epätahtimoottorien katkaisuvirta saadaan yhtälöstä

$$I_b = \mu q I''_k, \quad (26)$$

missä q on epätahtimoottorien korjauskerroin katkaisuvirran laskemisessa. Korjauskerroin q lasketaan seuraavasti

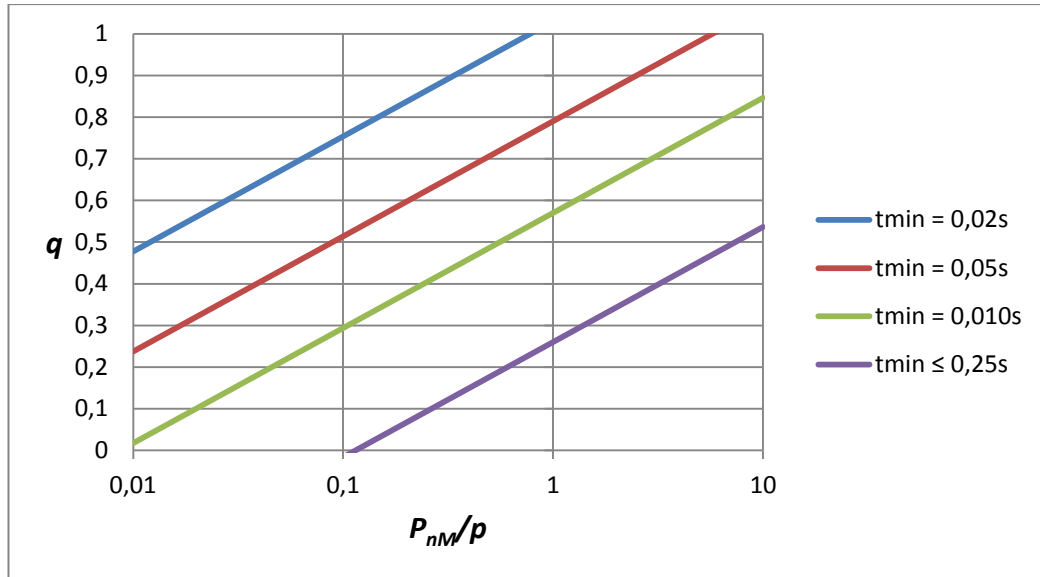
$$q = 1,03 + 0,12 \ln P_{nM}/p, \text{ kun } t_{min} = 0,02s, \quad (27)$$

$$q = 0,79 + 0,12 \ln P_{nM}/p, \text{ kun } t_{min} = 0,05s, \quad (28)$$

$$q = 0,57 + 0,12 \ln P_{nM}/p, \text{ kun } t_{min} = 0,10s, \quad (29)$$

$$q = 0,26 + 0,12 \ln P_{nM}/p, \text{ kun } t_{min} \geq 0,25s, \quad (30)$$

missä P_{nM} on moottorin nimellispäteho ja p moottorin napaparien lukumäärä. Vastaava on esitetty kuvassa 4.12, mistä korjauskerroin voidaan myös arvioida. Mikäli laskennallisesti saataisiinkin korjauskerroin suuremmaksi kuin yksi, käytetään myös tällöin arvoa yksi.



Kuva 4.12 Epätahtimoottorin katkaisuvirran korjauskertoimen q määrittäminen katkaisuviiveen t_{min} ja nimellisen napaparitehon P_{nm}/p suhteen. [IEC 60909 2001]

Säteittäisen verkon eri haarojen syöttämät katkaisuvirrat voidaan huomioida laskemalla ne yhteen, jolloin saadaan vikapaikan katkaisuvirta.

Mikäli oikosulkuvirtaa ei syötä tahti- ja epätahtikoneet eli toisin sanoen oikosulkuvirta ei juuri vaimene, katkaisukerroin on yksi ja $I_b = I''_k$. Samoin joissain tapauksissa voidaan katkaisuviiveen aikainen vaimeneminen jättää huomioimatta, ja käyttää myös tällöin katkaisuvirtana alkuoikosulkuvirtaa, jolloin todellinen katkaisuvirta olisi kuitenkin hieman pienempi. Tämä voi tulla kyseeseen laajojen säteittäisten ja silmukoitujen verkkojen kohdalla sekä epäsymmetrisillä oikosulkuvirroilla, joiden kohdalla jätetään huomioimatta koneiden vuomuutokset käämeissä. 110 kV verkon syöttämä oikosulkuvirta ei juuri vaimene päämuntajan takaisen keskijänniteverkon oikosuluissa, jolloin syöttävän verkon katkaisuvirtana voidaan käyttää alkuoikosulkuvirtaa. [Teollisuuden sähköverkot 2 1985; Huotari 1998; IEC 60909 2001]

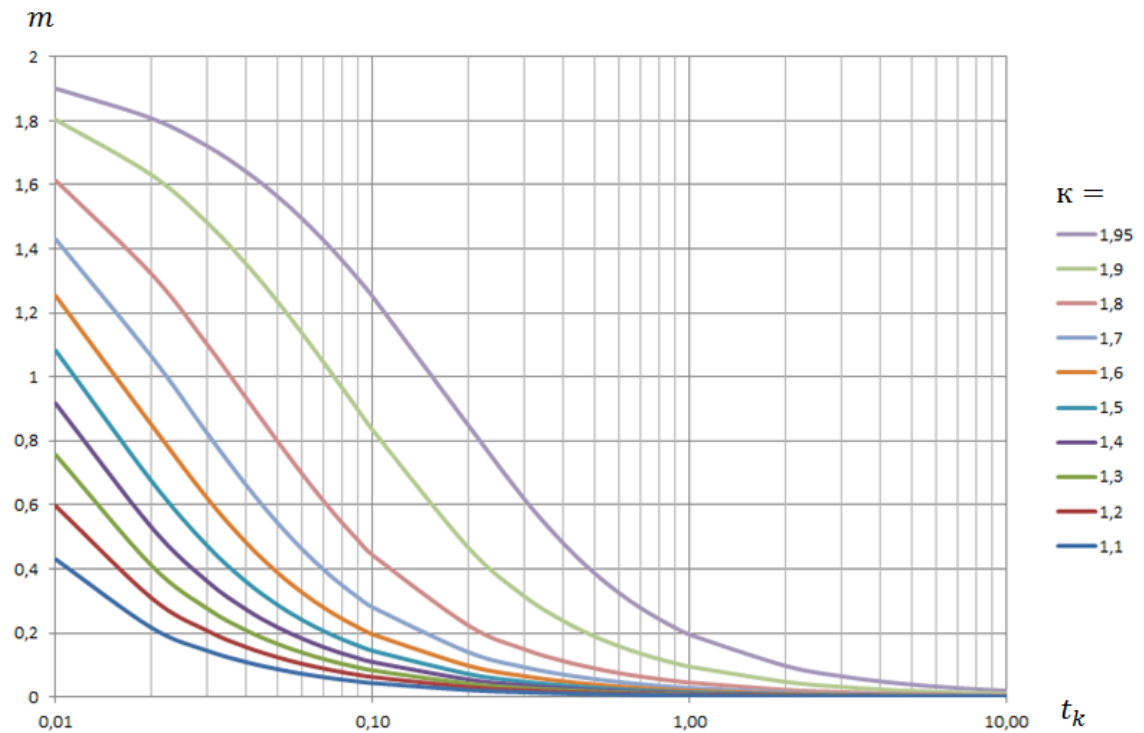
4.4.5 Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta I_{th}

Oikosulkuvirran aiheuttama lämpeneminen määrää sähkölaitteiston komponenttien termisen mitoituksen alarajan, joka on huomioitava verkon oikosulkukestoisuuden mitoituksessa. Koska oikosulkuvirta usein muuttuu oikosulun aikana, lasketaan tiettyä aikaa vastaava keskimääräinen tehollinen oikosulkuvirta, jonka lämpövaikutus vastaa todellista oikosulkuvirtaa. Tätä virtaa kutsutaan ekvivalentiksi termiseksi oikosulkuvirraksi. Lämpövaikutusta vastaa Joulen integraalin $\int i^2 dt$ mittaama energia, joka syntyy oikosulkupiirin resistansseissa [IEC 60909 2001]. Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta lasketaan alkuoikosulkuvirrasta

$$I_{th} = I''_k \sqrt{m + n} \quad (31)$$

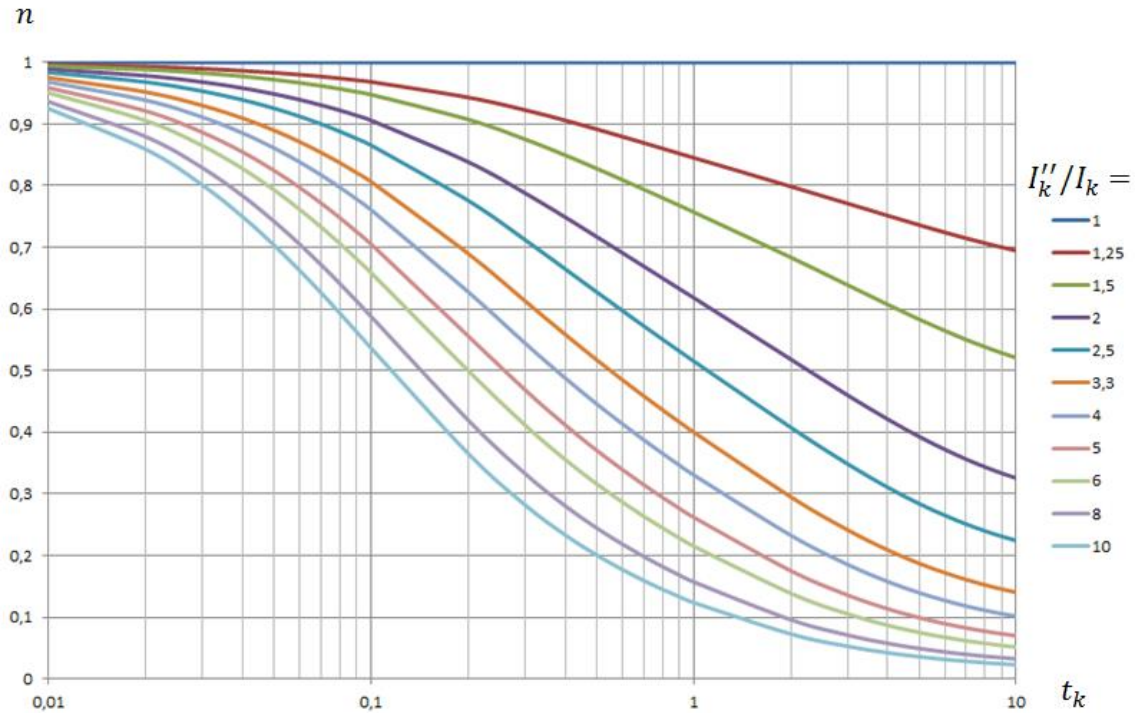
huomioimalla oikosulkuvirran vaimeneminen tasavirtatekijällä m ja vaihtovirtatekijällä n . [Teollisuuden sähköverkot 2 1985]

Tasavirtatekijä huomioi tasavirtakomponentin ja vaihtovirtatekijä vaihtovirtakomponentin vaimenemisen. Tasavirtatekijä voidaan määrittää kuvasta 4.13.



Kuva 4.13 Tasavirtatekijän m määrytyminen sysäyskertoimen κ ja oikosulun kestoajan t_k funktiona. [IEC 60909 2001]

Oikosulun kesto aika sisältää katkaisuviiveen lisäksi valokaaren sammumiseen kuluvan ajan. Vaihtovirtatekijään vaikuttaa oikosulun kestoajan lisäksi alkuoikosulkuvirran ja pysyvän tilan virran suhde kuvan 4.14 mukaisesti.



Kuva 4.14 Vaihtovirtatekijän n määräytyminen virtasuhteen I''_k/I_k ja kestoajan t_k suhteen. [IEC 60909 2001]

Tasa- ja vaihtovirtatekijöitä ei tarvitse huomioida kaukana tahtikoneesta tapahtuvissa oikosuluissa oikosulun kestoajan ollessa vähintään 0,5 s. Mikäli oikosulkupiirissä käytetään automaattista jälleenkytkentää, täytyy jälleenkytkentöjen erisuuret vikavirrat kesto-aikoihin huomioida, jotta saadaan piiriä vian aikana kokonaisuudessaan rasittava terminen oikosulkuvirta arvioitua. Jos piirin suojalaitteena käytetään sulakkeita tai virtaa rajoittavia katkaisijoita, voivat niiden toimintakäyrät rajoittaa esiintyvää termistä oikosulkuvirtaa pienemmäksi. Mikäli vikavirtaa syöttää useampi lähde, voidaan haaravirrat summata yhteen kokonaisvikavirraksi. Tällöin on huomioitava oikosulkulähteiden ja vikapaikan nimellisvirtojen erot. Tämä onnistuu painotuskertoimilla, jonka arvoina voidaan käyttää moottoreille arvoa 0,95 ja syöttävälle verkolle sekä generaattoreille arvoa 1,0. [Huotari 1998; IEC 60909 2001]

Suojauksen kannalta on oleellista tarkastaa suojauksen riittävän nopea toiminta, jottei verkon komponenttien terminen kestoisuus ylity. Verkon komponenttien terminen kestoisuus ilmoitetaan yleensä yhden sekunnin termisenä oikosulkuvirtana I_{1s} , jolloin se täytyy muuttaa suojauksen toiminta-aikaa vastaavaksi tai toisin päin. Kun oikosulku kestää 0,2...5 s, saadaan

$$I_{th} = I_{1s}/\sqrt{t_k} \quad (32)$$

oikosulun kestoajan ollessa t_k [Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000].

4.5 Maasulkuvirrat ja -jännitteet

Oikosulun kohdalla vikavirran suuruus määräytyy suurelta osin syöttävän verkon oikosulkutehosta ja verkon sähkökoneista, joiden vaikutus näkyy virran vaimenemisena

alkuhetkestä. Maasulkuvirrat määräytyvät verkon tähtipisteen maadoituksen sekä verkon laajuuden perusteella. Verkko voi olla maadoitusjärjestelmältään

- maasta erotettu
- sammutettu eli kompensoitu
- impedanssin kautta maadoitettu
- väliaikaisesti impedanssin kautta maadoitettu [SFS 6001+A1+A2 2009].

Keskijänniteverkot ovat joko maasta erotettuja tai sammutettuja, jolloin maan ja tähtipisteen välillä ei ole hyvin johtavaa yhteyttä. Tällöin maasulkuvirta jää selvästi oikosulkuvirtaa pienemmäksi. 400 V verkot ovat suoraan maadoitettuja, jolloin maan ja tähtipisteen välillä on vain nolla- tai suojajohtimen pieni resistanssi. Suoraan maadoitetussa verkossa esiintyvä yksivaiheinen vika on oikosulku, joka laukaistaan oikosulkusuojalla. Teollisuuden 500 V verkot olivat aiemmin maasta erotettuja, mutta nykyisin ne ovat usein suuren resistanssin kautta maadoitettuja, jolloin niiden maasulku voidaan tunnistaa helpommin maasulun valvontalaitteilla. Maasulun paikantamiseksi tai poislaukaimiseksi kytketään väliaikaisesti pieni resistanssi suuremman rinnalle, jolloin virran muutos voidaan tunnistaa viallisesta lähdöstä. [Teollisuuden sähköverkot 2 1985]

4.5.1 Maasta erotettu verkko

Maasta erotettu verkko kytkeytyy maahan ainoastaan maakapasitanssiensa kautta. Normaalitilassa verkko on symmetrinen maahan nähden vaiheiden maakapasitanssien C_0 ollessa keskenään samansuuruisia, jolloin niiden kautta kulkevat varausvirrat ovat myös symmetrisiä eli niiden summa on nolla. Myös verkon vaihejännitteet maahan nähden ovat symmetrisiä ja summa on nolla. Maasulussa terveiden vaiheiden jännitteet maata vasten kasvavat, jolloin muodostuu epäsymmetria eikä varausvirtojen summa ole enää nolla. Tämä erotusvirta kulkee vikapaikassa maahan maasulkuvirtana. Maasulkuvirran itseisarvo I_{ef} saadaan yhtälöstä

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{3}\omega C_0}{\sqrt{1+(3\omega C_0 R_f)^2}} U, \quad (33)$$

missä C_0 verkon yhden vaiheen maakapasitanssi, R_f mahdollinen vikaresistanssi ja U verkon pääjännite. Vikaresistanssittoman maasulkuvirran yhtälö sievenee muotoon

$$I_e = \sqrt{3}\omega C_0 U. \quad (34)$$

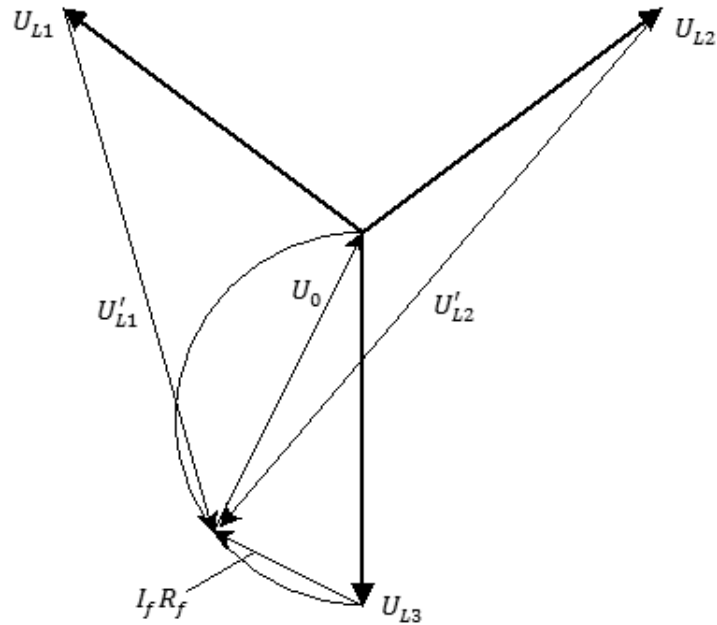
Yhtälö (33) voidaan esittää myös muodossa

$$I_{ef} = \frac{I_e}{\sqrt{1+(\sqrt{3}I_e R_f/U)}}. \quad (35)$$

Maasulkuvirrasta aiheutuneen jännite-epäsymmetrian takia verkon tähtipisteen ja maan välille muodostuu potentiaaliero, jota kutsutaan nollajännitteeksi. Nollajännite vastaa maasulkuvirran maakapasitansseissa synnyttämää jännitettä, jolloin pätee

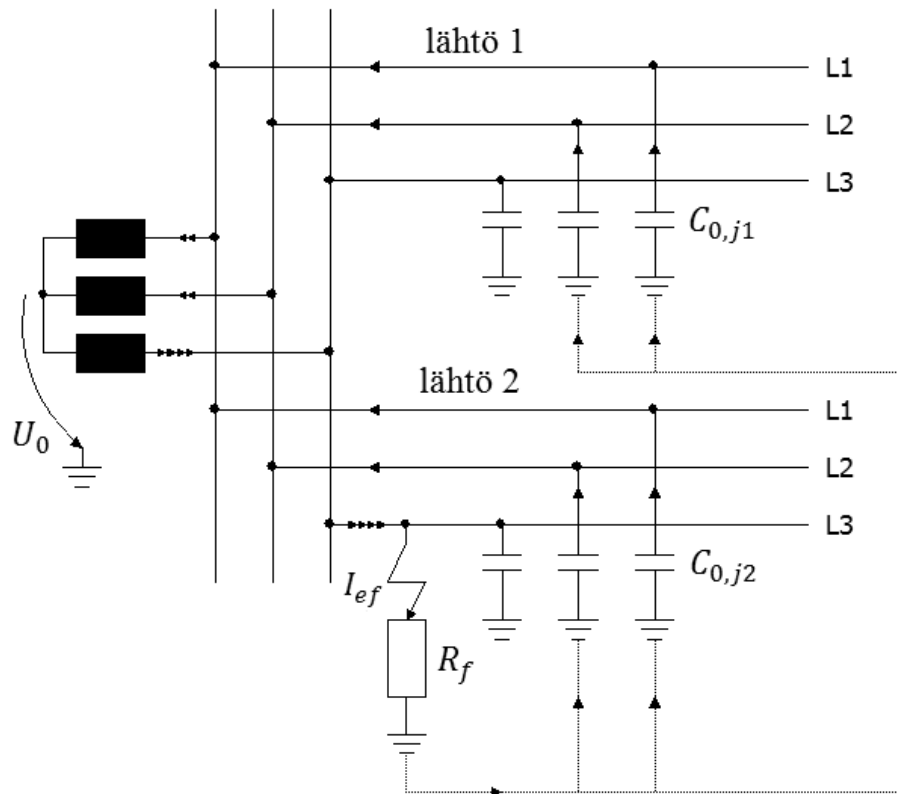
$$U_0 = \frac{I_{ef}}{3\omega C_0}. \quad (36)$$

Kuvan 4.15 osoitinpiirroksessa on esitetty verkon jännitteet ennen vikaa ja vian aikana.



Kuva 4.15 Verkon jännitteet ja nollajännite maasulussa ja normaalissa tilassa. $U_{L1}..U_{L3}$ ovat vaihejännitteet terveessä tilassa, U'_{L1} ja U'_{L2} terveiden vaiheiden jännitteet vian aikana ja I_f vikaresistanssin läpi kulkeva vikavirta. [Maasulkusuojaus keskijänniteverkossa 1973]

Nollajännite on siis 90 astetta maasulkuvirtaa edellä. Nollajännite voi ilmetä vaarallisenä kosketusjännitteenä, minkä vuoksi maasulku aiheuttaa vähintään vaaraa henkilöturvallisuudelle. Vaiheiden väliset pääjännitteet ja kuormitusvirrat eivät muutu yksivaiheisessa maasulussa, joten kuormitus ei häiriinny. Syntynyt jännite-epäsymmetria ilmenee koko galvaanisesti yhteen kytketyn verkon alueella, jolloin koko verkko osallistuu maasulkuvirran syöttämiseen. Verkon yhteen laskettu pituus yhdessä maakapasitanssien kanssa määrää maasulkuvirran suuruuden. Vierekkäiset lähdöt syöttävät muuntajien ja generaattoreiden käämien välityksellä maakapasitansseihinsa verrannolliset osuudet viallisen lähdön vikaantuneen vaiheen maasulkuvirrasta. Myös vikaantunut lähtö syöttää terveiden vaiheidensa osalta oman osansa vikavirrasta. Maasulkuvirran kulkua maasta erotetussa verkossa havainnollistaa kuva 4.16. [Teollisuuden sähköverkot 2 1985; Mörsky 1992; Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]



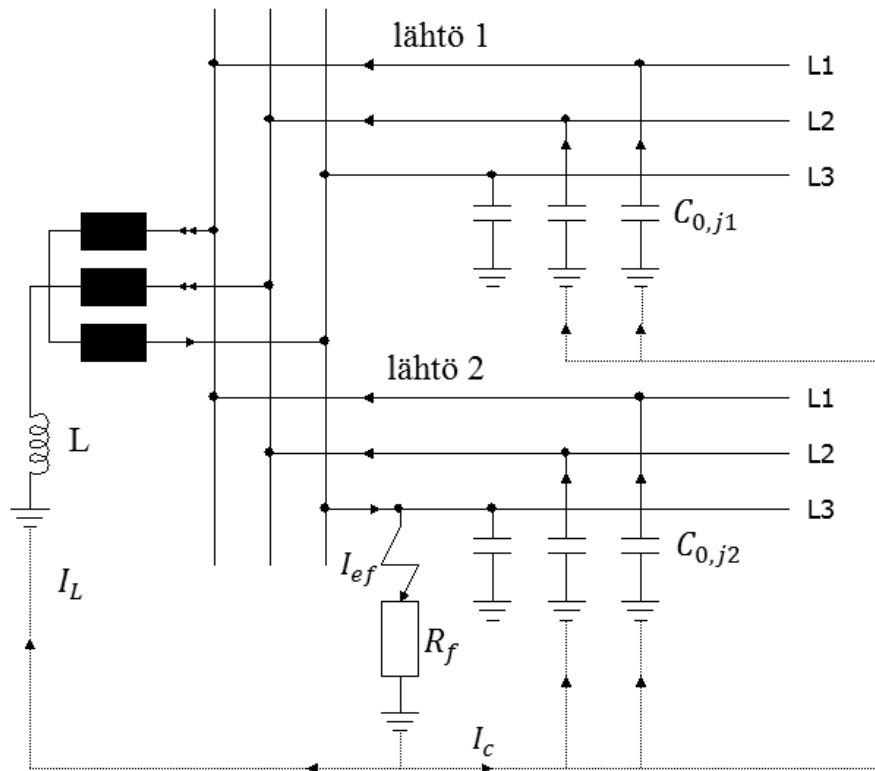
Kuva 4.16 Maasulkuvirran muodostuminen maasta erotetussa verkossa. $C_{0,j1}$ ja $C_{0,j2}$ ovat johtojen 1 ja 2 maakapasitanssit. [Teollisuuden sähköverkot 2 1985]

Maasulun aikaansaama terveissä vaiheissa tapahtuva jännitteiden nousu voi muistuttaa transienttimaisen ylijännitteen syntymistä. Vaihejännitteen huippu voi saavuttaa moninkertaisen arvon normaaliin nähden maasulun alussa. Pysyvässä tilassakin vaihejännite voi olla normaalin tilan pääjännitettä suurempi. Ylijännite voi heikoimmassa kohtaa eristystä aiheuttaa läpilyönnin, jolloin syntyy kaksoismaasulku. Yksivaiheisen maasulun aiheuttaman terveiden vaiheiden jännitteiden nousu onkin yleisin kaksoismaasulun aiheuttaja. [Maasulkusuojaus keskijänniteverkossa 1973; Mörsky 1992]

Kaksoismaasulussa ilmenee yksivaiheisen maasulun tapaan nollajännite ja verkon kapasitanssien kautta kulkeva maasulkuvirta, mutta lisäksi myös vaiheiden välillä kiertävä, vikapaikkojen välillä maassa kulkeva oikosulkuvirta. Nollajännitteen ja virtojen suuruus riippuu suuresti verkon laajuudesta, vikapaikkojen sijainnista, maan johtavuudesta ja vikaresistansseista. Kaksoismaasulku voi sattua samalla tai eri johtolähdöillä. Nollajännite jää yleensä aina yksivaiheisen maasulun nollajännitettä pienemmäksi. Pienimmillään nollajännite on suppeassa verkossa, kun vikaresistanssit ovat pieniä ja keskenään samansuuruisia. Suurimmillaan nollajännite voi olla yhtä suuri kuin yksivaiheisessa maasulussa, kun toinen vikaresistanssi on nolla toisen ollessa huomattava. Vikaresistanssien ollessa pienet, vaiheiden välinen oikosulkuvirta on suuruudeltaan kaksivaiheisen oikosulkuvirran luokkaa varsinkin, kun vikapaikkojen välisen maan resistanssi on pieni. [Mörsky 1992]

4.5.2 Sammutettu eli kompensoitu verkko

Sammutetussa eli kompensoidussa verkossa pyritään kompensoimaan verkon johdoilla syntyvä kapasitiivinen reaktanssi samansuuruisella induktiivisella reaktanssilla. Tämä toteutetaan johonkin verkon tähtipisteeseen asennettavalla sammutus- eli kompensointikuristimella. Yksivaiheisessa maasulussa suurin osa vikavirrasta kulkee kuvan 4.17 mukaisesti kuristimen kautta kompensoiden johtojen maakapasitanssien kautta kulkevan kapasitiivisen virran, jolloin verkon kokema maasulkuvirta jää 5...10 % vastaavan maasta erotetun verkon maasulkuvirrasta. [Maasulkusuojaus keskijänniteverkossa 1973; Mörsky 1992]



Kuva 4.17 Maasulkuvirta kompensoidussa verkossa, jossa L on kompensointikuristin, I_L maasulkuvirran kuristimen kautta kulkeva virta ja I_C maasulkuvirran maakapasitanssien kautta kulkeva virta. [Maasulkusuojaus keskijänniteverkossa 1973]

Toisaalta kompensoidun verkon nollajännite kasvaa maasta erotetun verkon nollajännitettä suuremmaksi maasulussa. Mikäli eri vaiheiden maakapasitanssit eivät ole symmetrisiä toisiinsa nähden, esiintyy normaalissa tilassakin nollajännite. Tämä tosin on enemmän ajojohtoverkkojen ongelma, mikä saadaan korjattua vuorottelemalla vaihejohtimien keskinäistä sijaintia toisiinsa nähden.

Kompensoinnin ongelmaksi muodostuu sammutuskuristimen sijoitus. Suomessa käytetään yleisesti 110 kV muuntajien kytkentäryhmänä YNd11, jolloin keskijänniteverkon puolella ei ole tähtipistettä käytettävissä. Vastaavasti Yyn0 kytkentäryhmän muuntajalla on tähtipiste, mutta sen rinnankäyttö verkossa ei onnistu eri kytkentäryhmän muuntajan kanssa. Olemassa olevan verkon kompensointi onnistuu erillisellä maadoitusmuuntajalla, jonka tähtipisteeseen kuristin kytketään. Toinen vaihtoehto on hajau-

tettu kompensointi, missä kuristimet sijoitetaan hajautetusti verkkoon jakelumuuntajien yhteyteen.

Kompensoinnin ansiosta maasulkuvirta ja maasulun aiheuttamat ylijännitteet jäävät pienemmiksi. Valokaariviat sammuvat usein itsestään, jolloin maasulut poistuvat nopeasti verkosta. Tämä vähentää ylijännitteiden verkon eristeille aiheuttamaa jännite- rasi- tusta, jolloin voidaan välttää maasulun kehittyminen kaksoismaasuluksi tai oikosul- kuviaksi. Vikapaikalla esiintyvä vaarajännite on pienempi kuin maasta erotetussa ver- kossa. [Mörsky 1992]

4.5.3 Suoraan tai impedanssin kautta maadoitettu verkko

Suoraan tai pienellä impedanssilla maadoitetuissa verkoissa vaiheen ja maan välisen oikosulun virta voi olla joissain tilanteissa jopa kolmivaiheista oikosulkuvirtaa suurem- pi. Tämä on mahdollista oikosulun sattuessa tiettyjen kytkentäryhmien muuntajien maa- doitetun toisiokäämin lähellä. Yksivaiheinen oikosulku aiheuttaa maasulkua suuremman virtarasi- tuksen vikapaikassa, mutta suuri oikosulkuvirta on helpompi havaita poiskyt- kemistä varten. Oikosulkusuojauksen tuleekin poistaa vika nopeasti, jotta virran vaiku- tusaika jää niin lyhyeksi, ettei termistä vahinkoa ehdi syntymään. Lyhyen vaikutusajan ja vikapiirin pienemmän impedanssin takia terveiden vaiheiden jännitteet eivät nouse yhtä suuriksi kuin maasta erotetuissa ja kompensoiduissa verkoissa. [Teollisuuden säh- köverkot 2 1985; Salminen 2008]

Varsinkin suppeissa ≤ 3 kV maasta erotetuissa verkoissa kapasitiivinen virta jää niin pieneksi, ettei maasulkuvirtaa pystytä mittaamaan luotettavasti. Tällöin on yleistä maadoittaa verkon tähtipiste suurella resistanssilla, jolloin maasulkuvirta kasvaa mitat- tavaan suuruusluokkaan, muttei niin suureksi, että se tulisi laukaista itsetoimivasti. Suurresistanssisesti maadoitetussa verkossa maakapasitanssit ei vaikuta käytännössä ollenkaan maasulkuvirtaan. Tällöin verkon kytkentätilanteella ei ole juurikaan vaikutus- ta maasulkusuojaukseen, jolloin se on helpompi toteuttaa. Resistanssin lisäys pienentää myös maasulussa aiheutuvia ylijännitteitä. Jos vastus mitoitetaan niin, että maasulkuvir- ran resistiivinen ja kapasitiivinen osa ovat keskenään yhtä suuria, ylijännitteet rajoittu- vat verkon kannalta vaarattomiksi. Tällöin maasulkuvirta kasvaa $\sqrt{2}$ -kertaiseksi maasta erotetun verkon maasulkuvirtaan nähden. Transienttiylijännitteiden lisäksi terveiden vaiheiden jännitteet sekä nollajännite ovat tällöin pienempiä. Suurresistanssisen maadoi- tuksen käyttöä estää keskijänniteverkossa sama syy kuin kompensoinnin käyttöä; tähti- piste puuttuu. Sen sijaan pienjänniteverkossa Dyn-kytkentäisillä muuntajilla ongelmaa ei ole, ja resistanssia käytetäänkin paljon teollisuudessa 500 V ja 690 V verkoissa. [Te- ollisuuden sähköverkot 2 1985; Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

4.6 Vikavirtalaskenta

Yhtä lailla sähköverkon suojauksen kuin mitoituksenkin suunnittelussa ja tarkastelussa tulee tietää verkon vikavirrat erilaisissa vika-, kytkentä- ja kuormitustilanteissa. Vika- virtojen määrittelyn avulla tarkastetaan verkon osien oikosulkukestoisuudet. Toisaalta

suojauksen asettelulla varmistetaan oikosulkukestoisuuksien alittuminen, mutta myös varmistetaan suojauksen toiminta pienimmillään vikavirroilla. Vikavirran aikaan saamat dynaamiset ja termiset vaikutukset verkon laitteille ovat verrannollisia oikosulkuvirran neliöön, minkä vuoksi on ensiarvoisen tärkeää tuntea verkon vikavirtojen arvot tarkasti. Tällöin voidaan verkko mitoittaa oikein kestäväksi vikavirtojen vaikutukset. Toisaalta verkon ylimitoittaminen aiheuttaa tarpeettomia lisäkustannuksia. [Teollisuuden sähköverkot 2 1985]

Vikavirtojen laskeminen on mahdollista käsin tai tietokoneohjelmistoilla. Theveninin menetelmällä päästään tarkkoihin laskentatuloksiin. Laaja verkko sisältää kuitenkin monia muuttujia, ja niiden huomioiminen on työläs prosessi. Tämänlaiseen laskentaan onkin mielekästä käyttää standardien mukaisia laskentaohjelmia. Vikavirtojen laskentaan voi tulla nopea tarve esimerkiksi uuden ennalta varautumattoman kytkentätilanteen muodossa. Tällöin käyttöhenkilöstö voi arvioida yksinkertaisemmalla laskennalla likimääräisesti vikavirtoja. Likimääräiseen käsinkin onnistuvaan laskentaan soveltuu ominaisoikosulkutehoihin perustuva menetelmä.

Vikavirtalaskentaa tulee pitää ajan tasalla verkon muutostöiden jälkeen. Tarkkaa laskentaa varten on verkon eri komponenttien oikosulkuimpedanssit laskettava. Komponenteille, kuten muuntajat, tahti- ja epätahtikoneet, kuristimet, johdot ja kiskot sekä syöttävä verkko, on kullekin omat laskentakaavansa. Oikosulkuimpedanssit ovat erilaiset eri tyyppien vioissa, ja ne voivat muuttua oikosulun aikana. Symmetrisen kolmivaiheisen oikosulkuvirran laskenta on yksinkertaisempaa kuin epäsymmetrisissä vikatilanteissa, koska laskennassa riittää myötäimpedanssien eli verkon normaalien oikosulkuimpedanssien käyttö. Kaksivaiheisen oikosulun laskennassa tarvitaan vastaimpedansseja. Kun vikaan liittyy maakosketus, laskentaan liittyvät myös nollaimpedanssit. [Teollisuuden sähköverkot 2 1985; Salminen 2008] Oikosulkuimpedanssien määrittämistä ja perusteellista vikavirtalaskentaa ei työssä esitellä, koska tarkasteluun saadaan valmiina lähtötietoina verkon vikavirtatiedot.

5 RELESUOJAUSTEKNIikka

Relesuojauksessa sähköverkon komponentteja suojaa kokonaisuus, johon kuuluvat mittamuuntajat, suojareleet ja katkaisijat. Standardi SFS 60050-448 määrittelee suojausjärjestelmän edellä mainittuna kokonaisuutena, pois lukien katkaisijat, sisältäen lisäksi katkaisijan laukaisupiirin, johdotukset, teholähteen, tiedonsiirron ja jälleenkytkentäautomaatiikan. Komponenteista tärkeimmät tehtävät ovat mittamuuntajilla ja releillä. Mittamuuntajien päätehtävä on muuntaa sähköverkon suuret mahdollisimman virheettömästi releille sopivaan muotoon, jota releet mittaavat ja arvioivat.

Relesuojauksen toiminnan tulisi olla herkkää, nopeaa ja selektiivistä verkon staabiiliuden vaarantumatta. Selektiivisyys tarkoittaa ensisijaisesti sitä, että vain vikaantunut kohde erotetaan. Toisekseen suojauksen tulisi myös kattaa koko suojattava järjestelmä. Lisäksi suojauksen tulisi olla käyttövarma, koestettava ja kuitenkin kustannuksiltaan kohtuullinen. [Mörsky 1992; Elovaara 2011]

Oiko- ja maasulkusuojauksen lisäksi verkon komponentit suojataan ylikuormitukselta. Generaattorit ja moottorit tarvitsevat usein monipuolisia suojaustoimintoja. Moottorit suojataan usein vinokuormitusta, käynnistyksen jumitilanteita sekä alijännitettä varten, jotka voivat johtaa laiterikkoon. Generaattoreiden tapauksessa tulee kiinnittää huomioita tahdissa pysymiseen ja estämään jännitteen nousu liialliseksi. [Mörsky 1992]

5.1 Kytkinlaitteet

Sähköverkon suojaus toteutetaan päävirtapiirissä kytkinlaitteilla. Katkaisija on kytkinlaite, joka suorittaa itse päävirtapiiriin kytkennän, joka on joko auki tai kiinni. Kytkinlaitteilla voidaan muuttaa verkon kytkentätilannetta, ja ohjata sähkön kulkua verkossa. Tässä yhteydessä keskitytään kuitenkin kytkinlaitteen toimintaan osana suojausta, jolloin sen tulee erottaa vika nopeasti verkosta katkaisemalla vikavirran kulku. Katkaisijan lisäksi muita kytkinlaitteita ovat erottimet, kytkimet, kuormanerotimet, kontaktorit, varokkeet ja varokeautomaatit. Erottimilla ei voida katkaista eikä kytkeä virtaa, vaan ne toimivat verkon osan erottamisessa esimerkiksi huoltokatkoissa. Kytkimellä voidaan katkaista kuormitusvirta, ja kuormaerotin toimii sekä kytkimenä että erottimena. Erottimet ja kytkimet eivät siis osallistu verkon vikavirtasuojaukseen. Sen sijaan katkaisijoiden lisäksi suojauksessa voidaan käyttää kontaktoreita, varokkeita ja varokeautomaatteja.

Kontaktorit sulkeutuvat ja avautuvat ohjausjännitteen mukaan, ja niitä käytetään usein moottorien kytkinlaitteena sekä pien- että keskijänniteverkossa. Kontaktorit eivät kykene katkaisemaan oikosulkuvirtaa, joten niiden yhteydessä käytetään usein varok-

keita. Varokkeita ja erilaisia kytkinvarokkeita käytetään pääasiassa pienjänniteverkon oikosulku- ja ylikuormitussuojana sekä kytkimenä. Varokkeen lauetessa joudutaan varoke vaihtamaan sähkön palauttamiseksi. Keskijännitteelläkin on käytössä yksittäisten kohteiden suojana varokkeita, kuten esimerkiksi muuntajan suojana. Keskijännitesulakkeista käytetään tavallisesti nimitystä ”suurjännite- eli sj-sulake”. Varokeautomaatit, joita kutsutaan kansan kielellä automaattisulakkeiksi, johdonsuojakatkaisijoiksi tai ”totsiksi”, korvaavat varokkeita pienjänniteverkon ylivirtasuojina. Niiden etuna on palautettavuus vian jälkeen. Sähköverkon suojauksessa voidaan käyttää edellä mainittuja vikavirran katkaisuun kykeneviä kytkinlaitteita. Keski- ja suurjänniteverkoissa suojaus toteutetaan relesuojauksena, johon liittyvät kytkinlaitteista ainoastaan katkaisijat. Katkaisijan tehtävä on suorittaa virran katkaisu releen laukaisukäskystä, josta sen oletetaan suoriutuvan. [Elovaara 2011]

5.2 Erilaiset releet rakenteen mukaan

Ensiö- eli primäärireleet ovat päävirtapiiriin suoraan kytkettäviä suojareleitä. Toisio- eli sekundäärireleet eivät kytkeydy suoraan päävirtapiiriin, vaan niiden välissä ovat mittamuuntajat, joiden toisiopuolelle toisioreleet kytkeytyvät. Mittamuuntajia ovat virta- ja jännitemuuntajat, jotka muuntavat virran ja jännitteen releille sopivaan muotoon mahdollistaen releiden pienen koon ja suuremman etäisyyden suojattavasta kohteesta. Sekundäärireleet ohjaavat katkaisijaa apusähkön avulla vikatilanteiden aikana. Apusähkö otetaan teholahteesta, jona käytetään yleensä kahta rinnakkaista akustoa, joita syötetään tasasuuntaajalla, mutta haluttaessa edullisempiakin ratkaisuja on olemassa. Sekundäärireleiden yhteydessä saatetaan tarvita apureleitä, mikäli suojareleen koskettimet eivät riitä tai ne ovat liian heikkoja kyseiseen tarkoitukseen. [Mörsky 1992; Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

Automaatiotekniikan kehittymisen myötä myös relesuojaukseen liittyvät valvontakeskukset ja tiedonsiirtoyhteydet ovat kehittyneet. Nykyiset sarjaliikenneväylät mahdollistavat helpomman johdotuksen ja keskitetyn valvonnan ja ohjauksen. Toisaalta valvontaa ja muutoksia on mahdollista tehdä etäyhteyksien myötä myös kauempaa. Kuitenkin uudesta tekniikasta huolimatta sähkölaitteistoissa on vanhoja kojeita, joita on voitava korvata samanlaisilla. [Mörsky 1992]

5.2.1 Sähkömekaaniset releet

Varhaisin relerakenne, ensiorele, kytketään suoraan päävirtapiiriin. Ensiorele ohjaa tavallisesti katkaisijan laukaisun mekaanisesti mittaussuureen ylittäessä toiminta-arvon. Mittausmuuntajavirheitä ei esiinny, joten toiminta on varmaa suurillakin ylivirroilla, mutta asettelutarkkuus jää usein huonoksi. Myös dynaaminen kestoisuus ja apukoskettimien puuttuminen rajaavat käyttömahdollisuuksia. Käytön aikainen asettelu on hankalaa, ja koestus vaatii suojattavan kohteen jännitteettömyyden.

Ensioreleiden sijaan on jo pitkään käytetty mittamuuntajan toisioon kytkettäviä toisioreleitä. Toisioreleen ominaisuudet ja käyttömahdollisuudet ovat laajemmat eikä

koestus vaadi ensiöpiirin jännitteettömyyttä. Energiansa toisioon kytketyt sähkömekaaniset releet ottavat mittamuuntajilta, mikä kasvattaa mittamuuntajien taakkaa. Suuri taakka voi aiheuttaa mittausvirheitä varsinkin tasavirtakomponenttia sisältävässä vikavirrassa, mutta toisaalta herkkyys ulkoisille häiriöille pienenee.

Sähkömekaaniset releet mittaavat mittaussuureiden tehollista arvoa. Tämä tapahtuu yleensä suureen aikaansaaman sähkömagneettisen voiman vertaamisella mekaaniseen voimaan, kuten jousen voimaan. Kuvatun toimintatavan koneisto sisältää hitaasti liikkuvia osia, minkä takia ei ole mahdollista mitata vaihtosuureiden hetkellisarvoja. Myös toiminnan aikaviivästys on toteutettu kellokoneistolla. Mekaniikan hitaudesta johtuen sähkömekaanisia releitä on hankala saada nopeiksi ja herkkäliikkeisiksi. Mekaniikka asettaa haasteita myös useamman suureen mittaamiseen, minkä vuoksi sähkömekaanisilla releillä on hankala toteuttaa tarkasti haastavimpia suojauksia. Sähkömekaaniset releet ovat osoittautuneet luotettaviksi ja niiden käyttöikä on useita vuosikymmeniä. Liikkuvat osat vaativat kuitenkin säännöllistä huoltoa. [Mörsky 1992; Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

Tasasuuntaajarele kehitettiin herkkyyttä ja nopeutta vaativiin suojaustarkoituksiin. Sen mittaustarkkuus perustuu herkkään kiertokäämikelaan, jonka kosketin käskää erillistä lähtörelettä. Herkkä tasavirtakela tarvitsee tasasuuntaussillan sekä kelan ja sillan väliin sijoitettavan suurilla virroilla kyllästyvän suojamuuntajan. [Mörsky 1992]

5.2.2 Staattiset eli elektroniset releet

Staattiset eli elektroniset releet ilmestyivät markkinoille jo 1960-luvulla. Ensimmäisten analogiatekniikalla toteutettujen versioiden rinnalle on tullut myös digitaalteknikalla toteutetut. Staattisilla releillä on erillinen tehonsyöttönsä, jolloin mittapiirin kuormitus on pienempi. Sähkömekaanisten releiden mittamuuntajille aiheuttama taakka saattaa olla useita kymmeniä voltitiampeereita, kun staattisilla releillä voidaan jäädä alle voltitiampeeriin vastaavalla toisiovirralla. Lähtöreleenä voidaan käyttää usean koskettimen apurelettä, jolloin suojausta hidastavia mahdollisia välireleitä ei tarvita eri ohjauskäskyjen toteuttamiseen.

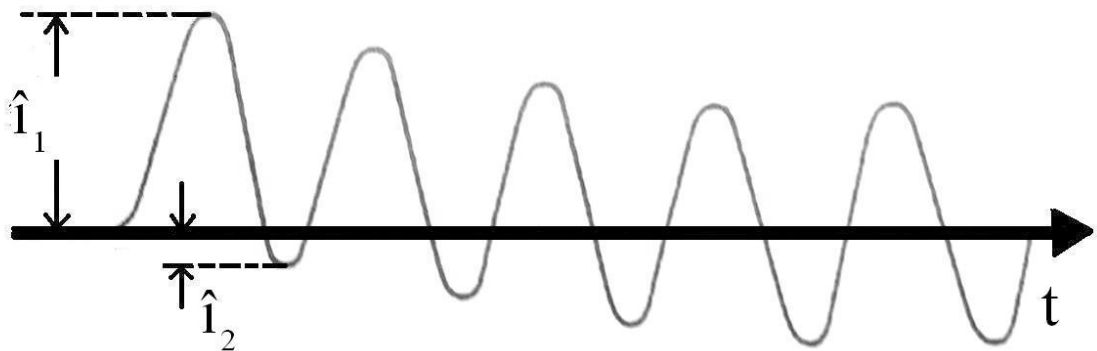
Staattinen rele liittyy sovitusmuuntajalla mittamuuntajan toisioon. Sovitusmuuntaja muuntaa mittaussuureet releen elektroniikkaa varten sopiviksi. Galvaaninen erotus suojaa samalla elektroniikkaa ylivirtojen ja -jännitteiden rasituksilta ja häiriöiltä. Mikäli sovitusmuuntajassa käytetään ilmväliä, voidaan tasavirtakomponentin epäsymmetrinen vaikutus poistaa liki pitäen kokonaan. [Mörsky 1992, s. 23]

Staattiset releet sisältävät liikkuvia osia ainoastaan kosketintoimintoja käyttävissä apureleissa elektroniikan korvatesa liikkuvat osat mittauksessa ja aikahidastuksessa. Näin saavutetaan tarkempi ja nopeampi toiminta, jonka yhtenä etuna on porrasaikojen lyheneminen aikaselektiivisessä suojauksessa. Myös asetteluarvojen alue on laajempi tarkkuuden kärsimättä ja asettelujen pysyvyys parempi. Elektroniikan etu on myös kompaktimpi koko ja useiden suojausominaisuuksien sisällyttäminen releeseen tai oikeastaan releyksikön sisältämään kokonaisuuteen. [Mörsky 1992; Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

5.2.3 Numeeriset eli mikroprosessorireleet

Numeeriset eli mikroprosessorireleet uudistivat releissä käytettyä digitaalitekniikkaa mikroprosessorilla ilmestyessään 1980-luvun alussa. Ensimmäisen polven mikroprosessorireleissä signaalin käsittely mahdollisti laajemman suojaustoimintomäärän integroimisen yhteen releyksikköön ja merkittävänä uudistuksena yksikön itsevalvonnan. Toisen polven prosessorireleet lähettävät kosketintietojen lisäksi mittaus-, tila- ja asettelutietoja ja vastaanottavat tila- ja asettelukäskyjä. Releyksikköä käytetään suojareleen lisäksi myös tiedon keräämiseen, jolloin voidaan puhua kennoterminaalista.

Prossessorirele on toiminnaltaan entistä tarkempi ja nopeampi. Huipusta huippuun-mittaus poistaa vikavirran epäsymmetriasta johtuvan virheen vaikutuksen suojauksessa täysin. Mittaus laskee positiivisen ja negatiivisen puolijakson huippujen välisen keski-arvon, jotka on esitetty kuvassa 5.1.



Kuva 5.1 Huipusta huippuun –mittaus, joka laskee positiivisen puolijakson huippuarvon \hat{i}_1 ja negatiivisen puolijakson huippuarvon \hat{i}_2 välisen keskiarvon. [Mörsky 1992]

Toiminta-ajan tarkkuus ja aika-arvojen aseteltavuus ovat myös kehittyneet. Toiminta-aika perustuu kideohjattuun kelloon ja aika-asettelut tehdään digitaalisesti, jolloin analogiatekniikasta aiheutuneet epätarkkuudet poistuvat. Käyttöliittymän näyttämä on selkeämpi erilaisten kerrointen avulla muodostettavien arvojen sijaan näytettävien todellisten arvojen ansiosta.

Prossessoritekniikan logiikalla on aikaisempaa helpompaa toteuttaa monipuolisia suojausominaisuuksia yhteen kennoterminaaliiin, jota voidaan käyttää useiden eri suojauskohteiden suojaamiseen. Eri suojauskohteissa ilmenevät normaaliin toimintaan liittyvät tapahtumat aiheuttavat vikatapauksia läheneviä arvoja mittaussuureissa. Tällaiset tilanteet, kuten moottorien käynnistykset ja muuntajien verkkoon kytkennät voidaan tunnistaa loogisilla toiminnoilla. Suojauksen selektiivisyys helpottuu useamman toimintaportaan avulla, mikä karsii myös aiheettomia toimintoja. Katkaisijavian tunnistaminen toteutetaan myös loogisesti, jolloin rele viestii katkaisijan toimimattomuuden varasuojalle, joka laukaisee vian.

Nykyaikaiset tietoliikennetyhteydet mahdollistavat lähtöreleiden ja keskitetyn ohjauskeskuksen välisen molemminpuolisen tiedon siirtämisen. Lähtörele hoitaa suojaustehtävänsä automaattisesti, mutta sitä voidaan käskyttää ja lukea tietoja etänä. Releeltä saadaan keskuksesta käsin luettua muun muassa virta-, jännite- ja teholukemat,

tapahtumat, häiriörekisteri, asettelut ja kytkinlaitteiden asentotiedot. Tapahtuma- ja häiriötietoihin tallentuu ajat. Myös häiriövirrat ja –jännitteet rekisteröityvät. Relettä voidaan ohjata keskukselta suorittamaan katkaisijan kiinni- tai aukiohjaus, muuttaa releen asetteluja ja kuitata hälytys. Asettelyjen muuttaminen vaatii salasanan.

Nyky aikaisten kennoterminaalien käyttöönotto ja käyttö on selkeää. Ne sisältävät isot ja selkeät näytöt, joiden avulla voidaan seurata mittaustietoja reaaliaikaisesti. Mittaus- ja asettelutiedot näytetään suoraan mitattavan piirin suhteen absoluuttisina arvoina. Kennolähdön kytkentätilanne voidaan kuvata näytölle erotin- ja asentotietoineen.

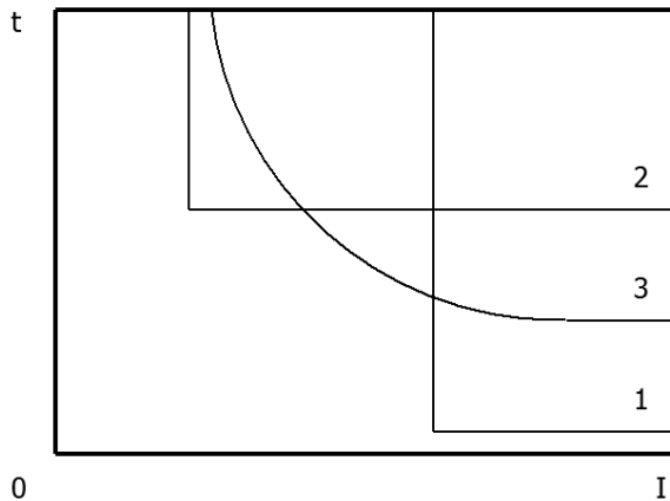
Numeerinen rele sisältää tärkeänä ominaisuutena itsevalvonnan, joka valvoo sekä releen toimintakuntoa, että estää viallisen releen virhetoiminnan ja aiheuttaa hälytyksen. Erillinen valvontapiiri valvoo prosessoria, joka valvoo lähes kaikkia releen piirejä. [Mörsky 1992; Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

5.3 Releiden toimintatavat

Suojareleitä luokitellaan toimintatavan eli mitatun suureen tai käyttöalueen perusteella. Rele toimii mittaussuureen ylittäessä asetusarvon, ja toiminta on joko hetkellinen tai aikahidastettu. Hidastus voi olla vakioaikainen tai mittaussuureesta riippuva kääntäen verrannollinen. Toiminnan perusteella voidaan releet jaotella karkeasti yli- ja alisuure-, suunta- ja vertoreleisiin. Jo staattisen releen yhteydessä yhdistyy kuitenkin useita toimintoja. Esimerkiksi moottorin suojarele sisältää usein suojan ylivirtoja, ylikuormitusta, vinokuormitusta ja maasulkua varten. Nykyään numeeriset yhdistelmäsuojareleet sisältävät usein tarpeeksi suojausominaisuuksia, jolloin eri suojauskohteisiin, kuten muuntajille ja moottoreille voidaan käyttää samoja kennoterminaaleja. [Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

5.3.1 Virtareleet

Virtaa mittaavia ja sen mukaan toimivia releitä ovat erilaiset ylivirtareleet ja lämpöreleet. Ylivirtareleitä käytetään tyypillisesti oikosulkusuojina, ja ne asetellaan yleensä muutosoikosulkuvirran mukaan määriteltävien pienimmän ja suurimman mahdollisen oikosulkuvirran mukaan. Ylivirtareleet voidaan toteuttaa myös ylivirtasuuntareleinä, jolloin vikavirran suunta eli vian sijainti vaikuttaa releen toimintaan. Ylivirtareleiden toimintaperiaatteet ovat hetkellinen, vakioaikainen ja käänteisaikainen, jotka on esitetty kuvassa 5.2.



Kuva 5.2 Ylivirtareiden toimintakäyrät, joista 1) kuvastaa hetkellistä, 2) vakioaika- ja 3) käänteisaikaylivirtatoimintaa. [Mörsky 1992]

Hetkellinen ylivirtarele toimii viiveettä, kun sen läpi kulkeva virta ylittää asetetun toiminta-arvon. Vakioaikaylivirtarele muodostuu ylivirtareleestä ja aikareleestä, ja se toimii, kun aikareleellä asetetun ajan verran havaitaan ylivirtareleelle asetetun virran ylittämä virta-arvo. Toimintanopeuteen ei vaikuta, kuinka suuri ylitys on. Vakioaikaylivirtarelettä käytetään samoin kuin hetkellistä ylivirtarelettä oikosulkusuojaukseen, mutta se täytyy asetella nopean toimintansa vuoksi selkeästi kuormitusvirran yläpuolelle, jotta lyhytaikaiset kuormituksen heilahtelut eivät aiheuttaisi aiheetonta toimintaa. Käänteisaikaylivirtarele toimii sitä nopeammin, mitä suurempi asetellun virran toiminta-arvon ylitys on. Käänteisaikatoimintakäyriä on useita eri tyyppejä, ja niitä voidaan asetella vapaastikin. Käänteisaikaylivirtareleellä voidaan lyhentää vikavirran vaikutusaikaa muihin ylivirtareleisiin nähden, ja ne soveltuvat hyvin sulakkeiden kanssa käytettäväksi.

Varsinkin hetkellisten ja vakioaikaylivirtareiden lisänä käytetään usein lämpöreleitä ylikuormitussuojina. Lämpörele jäljittelee suojauskohteen lämpötilaa virran ja ajan funktiona suojauskohteesta muodostetun mallin avulla. Malli perustuu lämpenemisaikavakioon, jonka tulisi vastata kohteen lämpenemisaikavakiota. Kohteet, jotka sisältävät eri lailla lämpeneviä ja kuormittuvia osia, vaativat usean säädettävän lämpenemisaikavakion. Lämpöreiden tavallisimmat käyttökohteet ovat generaattorit ja moottorit. [Mörsky 1992]

5.3.2 Jännitereleet

Alijänniterele toimii jännitteen alittaessa sen toiminta-arvon. Alijänniterelettä käytetään tyypillisesti suuren moottorin irrottamiseen verkosta, kun jännitteen laskiessa liiallisesti moottori uhkaa pysähtyä. Moottorin täytyy olla irtikytketty, jotta jännitteen palautuessa ei syntyisi oikosulkuvirran kaltaista sysäysvirtaa. Turhien katkojen välttämiseksi releen on siedettävä nopeat jännitteenvaihtelut. Moottorikytkinlaitteina käytetyt kontaktorit aukeavat automaattisesti jännitteen poistuessa, mutta ne eivät sisällä itsessään alijännitelaukaisun säätömahdollisuutta. Lyhytaikaisia katkoja varten voidaan kontaktorit varus-

taa erillisillä hidastimilla estämään aukeaminen. Ylijänniterele toimii suojattavan kohteen jännitteen noustessa aseteltuun arvoon. Ylijännitereleitä käytetään maasulussa syntyvän nollajännitteen, tahtigeneraattorien jännitteen nousun tai moottorijännitteiden epäsymmetrian tunnistamiseen. [Mörsky 1992]

5.3.3 Suunta- ja tehoreleet

Suunta- ja tehoreleet mittaavat jännitteen ja virran hetkellisarvoja tai näistä johdettuja tehon arvoja. Suunnattu ylivirtarele toimii mittaamansa virran sekä jännitteen ja virran välisen vaihekulman täyttäessä toimintaehdot. Suunnattujen ylivirtareleiden käyttösovelluksena ovat silmukkaverkkojen ylivirta- ja oikosulkusuojaus. Maasulun suuntarele mittaa nollavirtaa ja –jännitettä. Kun kumpikin suure ylittää asetusarvonsa ja suureiden välinen vaihekulma on määrätyllä alueella, rele toimii. Takatehorele mittaa pätötehon hetkellisarvoa. Takatehoreleen avulla voidaan estää generaattorin käyminen moottorina, jotta generaattoria pyörittävä turpiini tai moottori ei vahingoittuisi. [Mörsky 1992]

5.3.4 Vertoreleet

Vertoreleet vertailevat suoja-alueensa molemmiin puolin mittaamiaan suureita, kuten esimerkiksi kohteesta lähtevien ja poistuvien virtojen suhdetta. Oikein aseteltuna ja toteutettuna vertorele toimii absoluuttisesti selektiivisenä suojana suojaten vain suoja-alueensa. Näin ollen vertorele tarvitsee varasuojan eikä se vastaavasti toimi muille releille varasuojana. Johtosuojauksessa käytettävät apuyhteysvertoreleet tarvitsevat apuyhteyden suurten etäisyyksien välille. Paikallisten kohteiden suojaukseen, kuten muuntajat, koneet ja kiskot, käytetään differentiaalirelettä, joka ei käytä apujohtoyhteyttä. Apuyhteysvertoreleitä käytetään lähinnä siirtoverkon sekä sähkölaitosverkkojen puolella.

Differentiaalireleellä voidaan toteuttaa tärkeän kohteen tarkka suoja samoin kuin suurille vikavirroille alttiin kohteen nopea oikosulkusuoja. Releen tarkka toiminta edellyttää mahdollisimman tarkkaa mittausta mittamuuntajien välillä. Virtamuuntajien valmistuksessa syntyvät eroavaisuudet pyritään minimoimaan valitsemalla saman valmistuserän tuotteet. Suurin oikosulkuvirta tulee tuntea, ja mitoittaa virtamuuntajat niin, että ne eivät kyllästyisi aiheuttaen mittausvirhettä. Muuntajien suojauksessa joudutaan perinteisillä releillä käyttämään usein välivirtamuuntajia muuntajan kytkentäryhmän huomioimiseksi. Virtamuuntajavirheet ja muuntajaa suojatessa muuntajan tyhjäkäyntivirta, käämikytkimen säätö sekä hetkellisesti vaikuttava kytkentävirtasysäys, synnyttävät erotusvirran releeseen. Tämä erotusvirta huomioidaan releen epäherkistämisellä aiheettoman toiminnan välttämiseksi. Epäherkkyys toteutetaan releen piiriin lisättävällä vakavointikäämillä. Tällöin puhutaan vakavoidusta differentiaalireleestä. Kiskon suojana käytettävän differentiaalireleen vakautus eli stabilointi perustuu vakautusjännitteeseen tai virtojen suuntien vertailuun. Prosessorireleet suorittavat vertailun laskennallisesti, mistä on monta etua. Kyllästymisestä johtuvat mittavirheet virran mittauksessa pienenevät oleellisesti, koska välivirtamuuntajia ei tarvita, ja releen taakka päävirtamuuntajille

on pienempi. Toisiovirrasta käytetään vähiten kyllästynyttä osaa eli nollakohdan jälkeistä aallon neljänneistä. Prosessorirele pystyy huomioimaan myös käämikytkimen toiminnan muuntajan muuntosuhteessa. [Mörsky 1992; Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

5.3.5 Muut releet

Vinokuormitus- eli epäsymmetriareleitä käytetään kalliiden moottorien epäsymmetriasuojana. Kolmivaihejärjestelmän vinokuormitus syntyy virtaan myötäkomponentin rinnalle ilmestyvästä vastakomponentista. Epäsymmetrinen virta aiheuttaa verkon impedansseissa normaalista poikkeavia jännitehäviöitä, joka aikaan saa vastaavan epäsymmetrian jännitteeseen. Koneiden kohdalla vino kuormitus aiheuttaa vastustavan voiman myötä koneiden tärinää, ylikuumenemista, lisähäviöitä ja jännitteen nousua roottorissa. Epäsymmetriarele on periaatteeltaan virta- tai jänniterele, jolle syötetään erikoiskytkennöistä koostuvan suodattimen avulla eroteltu virran tai jännitteen vastakomponentti. Suurimmat vinokuormitukset syntyvät yksi- ja kaksivaiheisten oikosulkujen aiheuttamina, jolloin niiden keston tulisi jäädä lyhyeksi oikosulkusuojauksen lauetessa nopeasti. Myös yksittäisten vaihejohtimien katkeamiset ja kaksivaiheiset kuormat aiheuttavat verkon epäsymmetriaa. Toisaalta epäsymmetriarele voitaisiin luokitella vertoreleeksi, jossa vertailu tapahtuu vaihesuureiden välillä. [Mörsky 1992; Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

Taajuusreleet havahtuvat joko liian suureen tai pieneen taajuuteen. Alitaajuusrelettä käytetään erityisesti kantaverkossa kuormien irtikytkemiseen, kun taajuus laskee verkkohäiriön takia. Ylitaajuusreleellä on esimerkiksi mahdollista havaita tahtigeneraattoria pyörittävän voimakoneen nopeudensäätäjän vioittuminen.

Distanssireleet päättelevät vikapaikan etäisyyden mittaamalla releen ja vikapaikan välistä impedanssia releen virtojen ja jännitteiden avulla. Distanssireleet soveltuvat selektiiviseen johtosuojaukseen erityisesti silmukkaverkossa, jossa etäisyydet ovat suurempia kuin 10 km. Yhteiskäyttöön distanssireleiden rinnalle suositellaan kulkuaaltosuuntareleitä. Kulkuaaltosuuntareleen toiminta perustuu jännite- ja virtatransienttien muutosten seurantaan, jolla pyritään havaitsemaan vian suunta. Niitä voitaisiin käyttää myös säteittäisen jakeluverkon maasulkusuojauksessa. Kulkuaaltosuuntareleiden käyttö on harvinaista Suomessa. [Mörsky 1992]

5.4 Mittamuuntajat

Mittamuuntajilla muutetaan päävirtapiirin ensiösuureet toisioon kytkettäville mittaus- ja suojalaitteille, jotka voidaan sijoittaa etäämmälle päävirtapiiristä. Ensiö- ja toisiopiirin erillisyys mahdollistaa toisilaitteiden huollon ja koestuksen ilman päävirtapiirin jännitteettömyyttä. Mittamuuntaja suojaa toision laitteita päävirtapiirin ylijännitteiltä ja -virroilta.

Mittamuuntajissa ilmenee mittausvirheitä, sillä ne poikkeavat ideaalisesta muuntajasta. Todellisessa muuntajassa on aina impedanssia ja raudan permeanssi poikkeaa äärettömästä toisin kuin ideaalisessa muuntajassa. Impedanssit aiheuttavat jännitehävi-

öitä, ja kuormitusvirrasta epälineaarisesti riippuva permeanssi synnyttää magnetoimisvirran. Magnetoimisvirta aiheuttaa virtamuuntajan virtavirheen, johon vaikuttaa mitattavan virran suuruus ja virtamuuntajan toision taakka. Jännitehäviö aiheuttaa puolestaan jännitemuuntajan jännitevirheen, johon vaikuttavat muuntajan impedanssien lisäksi kuormitusimpedanssit kuormitusvirran kautta. Virran mittausta on haasteellisempaa kuin jännitteen virran suuremman vaihtelun ja toisaalta virtamuuntajan magnetoimisvirtaa kasvattavan tasakomponentin takia.

Mittamuuntaja koostuu ensiökäämistä, rautasydämeistä, toisiokäämistä ja käämien eristyksestä. Samaa muuntajaa, ja sen ensiötä, käytetään mittaus- ja suojaustehtäviin. Jännitemuuntajassa käytetään myös samaa sydäntä toision suojaus- ja mittauskäämeille tai niiden yhteiselle käämille. Sen sijaan virtamuuntaja tarvitsee erilliset mittaus- ja suojauskäämit sekä niille erilliset sydämet. Virtamuuntajan toisiokäämi on käytännössä oikosuljettu ja jännitemuuntajan puolestaan avoin. Virtamuuntajan toisiota ei saa avata eikä jännitemuuntajan toisiota oikosulkea. Toisiopiirin jokin kohta sekä kosketeltavissa olevat johtavat osat on aina maadoitettava ylijännitteiden varalta. [Mörsky 1992]

5.4.1 Jännitemuuntajat

Jännitettä voidaan mitata resistiivisellä tai kapasitiivisella jännitteenjakajalla sekä magneettisella tai kapasitiivisella jännitemuuntajalla. Kapasitiivinen jännitejakaja perustuu kondensaattoreilla tehtävään jännitejakoon eikä sitä voida kuormittaa paljoa. Kapasitiivinen jännitemuuntaja on kapasitiivisen jännitteenjakajan ja magneettisen jännitemuuntajan yhdistelmä. Kapasitiivisiä jännitemuuntajia käytetään lähinnä suurjänniteverkoissa. Keskijännitteellä käytetään yleensä magneettista eli induktiivista jännitemuuntajaa, johon keskitytään seuraavaksi.

Kolmivaihejärjestelmälle käytetään kullekin vaiheelle omaa yksivaiheista jännitemuuntajaa. Jännitemuuntajassa on suojaus- ja mittauslaitteille yhteisen ensiön ja sydämen lisäksi usein myös yhteinen toisiokäämi, joka täyttää sekä suojauksen että mittauksen vaatimukset. Nollajännitteen mittausta maasulkusuojausta vasten tarvitsee oman sydämen ja toisiokäämityksen, joka kytketään avokolmioon. Toisio ei saa oikosulkeutua missään tilanteessa, minkä vuoksi sille on ylivirta- ja oikosulkusuojauksensa, jonka toiminnasta tulisi seurata hälytys. Mittaus- ja suojalaitteet kytketään toisioon rinnan. [Mörsky 1992]

Kippivärähtely eli ferroresonanssi on tilanne, jossa verkon epälineaarinen tyhjäkäynti-induktanssi ja kapasitanssi synnyttävät keskenään värähtelevän resonanssin. Magneettisen jännitemuuntajan tapauksessa värähtely syntyy yleensä jonkin kytkentätoimenpiteen seurauksena jännitemuuntajan kyllästyessä, jolloin sen tyhjäkäynti-induktanssi yhdessä verkon maakapasitanssien kanssa saa aikaan alitaajuuden värähtelyn. Seurauksena voi olla pitkäaikainen ylijännite, maasulkureleen aiheuton toiminta ja pahimmillaan jännitemuuntajan tuhoutuminen termisen ylikuormituksen vuoksi. Kippivärähtelyn vaimentamiseen käytetään usein avokolmioon kytkettävää vaimennusvastusta monimutkaisempien vaimennustapojen sijaan. [Mörsky 1992; Teknisiä tietoja ja taukukoita 2000]

Jännitemuuntajan valinnassa on huomioitava muuntajan nimellisarvot, jotka perustuvat standardiin IEC 60044-2. Mitoitusensiöjännite U_{pn} valitaan verkon pääjännitteen mukaan, joka on 6 kV verkossa vaiheiden väliin asennettaessa 6 kV. Tähtipisteen ja maan väliin tai vaiheen ja maan väliin kytkettäessä jännitemuuntajan mitoitusjännite on vaihejännite, eli esimerkiksi $6000/\sqrt{3}$ V. Mitoitustoisiojännitteen U_{sn} arvot mittaus- ja suojaustarkoitukseen ovat 100 V, 110 V ja 200 V vaiheiden väliselle tai verkon tähtipisteen ja maan väliselle jännitemuuntajalle. Vastaavat arvot vaiheen ja maan välillä ovat $100/\sqrt{3}$ V, $110/\sqrt{3}$ V ja $200/\sqrt{3}$ V. Avokolmioon kytkettäessä toisiojännitteet voivat olla $100/3$ V, $110/3$ V ja $200/3$ V. Alleviivattujen arvojen käyttämisistä suositellaan Suomessa. Avokolmion mitoitusjännite $100/3$ V vastaa yksivaiheisen jännitemuuntajan kohdalla normaalitilan arvoa, ja kolmivaiheisessa kytkennässä vastaa 100 V käämin yli yksivaiheista täyttä maasulkua. Suurempi toisiojännite johtaa pienempään toisiovirtaan, jolloin mittajohtimien jännitteen alenema jää pienemmäksi ja mittauksen tarkkuus paremmaksi. [Mörsky 1992; Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

Jännitemuuntajan taakka muodostuu releistä ja mittalaitteista sekä niiden kytkentäjohtoista, ja taakan suurimman sallitun arvon määrää mitoitustaakka kyseisessä tarkkuusluokassa pysyttäessä. Mitoitustaakka ilmoitetaan näennäistehona S , joka saadaan toisiojännitteen kuorman admittanssin Y ja mitoitustoisiojännitteen neliön tulona. Standardiarvot ovat 10, 15, 25, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400 ja 500 VA, joista suositellut arvot on alleviivattu. Mitoitustaakkaa ei kannata ylittää, sillä jännitemuuntaja on tarkimmillaan taakan ollessa noin 0,6...0,65-kertainen mitoitustaakkaan nähden. Jännitemuuntaja kestää moninkertaisesti nimellistaakaan verran termistä ylikuormaa, jolloin ei pysyäkään tarkkuusluokassa. [Mörsky 1992; Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

Mitoitusjännitekerroin k_n määrittelee ylijännitteen, jonka jännitemuuntajan on kyettävä sietämään toiminnan pysyessä tietyissä tarkkuusarvoissa. Jännite kasvattaa magnetoimisvirtaa, joka muuntajan kyllästyessä kasvaa edelleen lisäten jännitevirhettä. Pahimmillaan tilanteesta aiheutuu termistä rasisusta muuntajalle. Mitoitusjännitekerroin on vaiheiden välille tai verkon tähtipisteen ja maan väliin kytkettäessä aina 1,2, joka on kertoimen pienin arvo. Vaiheen ja maan väliin kytkettävän jännitemuuntajan jännitekerroin pohjautuu maasulkuun ja sen aiheuttamaan terveiden vaiheiden jännitteiden nousuun. Tilanteessa huomioitavaa on ylijännitteen kesto aika, verkon maadoitustapa ja onko verkossa automaattinen maasulkulaukaisu. Taulukossa 5.1 esitellään mitoitusjännitekerroimen riippuvuus maadoitustavasta, kun ylijännitteen kesto aika on määrätty.

Taulukko 5.1 Mitoitusjännitekerroimen k_n määrytyminen maadoitustavan ja ylijännitteen kestoaikojen mukaan. [Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

| Mitoitusjännitekerroin k_n | Kesto aika | Verkon maadoitus | Automaattinen maasulkulaukaisu |
|---------------------------------|------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 1,2 | Jatkuva | Kaikki verkot | Kyllä tai ei |
| 1,5 | 30 s | Tehollisesti maadoitettu | Kyllä |
| 1,9 | 30 s | Ei-tehollisesti maadoitettu | Kyllä |
| 1,9 | 8 h | Maasta erotettu tai sammutettu | Ei |

Jännitemuuntajan tarkkuus määrätään tarkkuusluokalla, joka on mittauskäytössä vaativampi kuin suojauksessa. Tarkkuusluokalla määrätään suurin sallittu jännite- ja kulma- virhe. Jännitevirhe on samaan tasoon redusoitujen ensiön ja toisio- jännitteiden ero pro- senteissa eli

$$\text{Jännitevirhe} = \frac{K_n U_s - U_p}{U_p} \times 100\%, \quad (37)$$

missä K_n on mitoitusmuuntosuhde U_{pn}/U_{sn} , U_p on ensiöjännite ja U_s toisiojännite, kun ensiökäämin yli vaikuttaa jännite U_p .

Kulmavirhe vastaa toisio- ja ensiöjännitteen välistä kulmaeroa, ja on positiivi- nen, kun toisiojännite on ensiöjännitettä edellä. Tarkkuusluokat mittausjännitemuunta- jille esitetään taulukossa 5.2, josta ilmenee luokkien sallimat virherajat.

Taulukko 5.2 Mittausjännitemuuntajalle sallitut virherajat tarkkuusluokan perusteella. [Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

| Tarkkuusluokka | Jännitevirhe \pm % | Kulmavirhe \pm min |
|----------------|----------------------|----------------------|
| 0.1 | 0,1 | 5 |
| 0.2 | 0,2 | 10 |
| 0.5 | 0,5 | 20 |
| 1 | 1,0 | 40 |
| 3 | 3,0 | - |

Taulukon virherajat ovat käytössä mitoitusjännitteen alueella 80...120 % ja mitoitustaa- kan 25...100 % tehokertoimella 0,8 (ind.). Muuntajan sisältäessä useita toisiopiirejä, tulee virherajoissa pysyä muiden käämien taakan vaihdellella 0...100 % mitoitustaakas- taan. Lyhytaikaisesti ja satunnaisesti kuormittuvien käämien, kuten avokolmiokäämien, kuormitusta ei huomioida. Energian mittauksessa tarkkuusluokka määräytyy taulukon 5.3 mukaan.

Taulukko 5.3 Energian mittauksen mittarien ja mittamuuntajien tarkkuusluokat. ¹⁾ Erit- täin suurilla energiamäärillä käytetään tarkkuusluokan 0,2 mittareita. [Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

| Vuosittainen energian ku- lutus MWh | Mittarien tarkkuusluokka | Mittamuuntajien tarkkuus- luokka |
|--|--------------------------|-------------------------------------|
| ≤ 1000 | 2 | 0.5 |
| 1000 - 10 000 | 1 | 0.2 |
| $\geq 10\,000$ | 0.5 ¹⁾ | 0.2 |

Suojaus- ja avokolmiokäämien tarkkuusluokat esitetään taulukossa 5.4. Suojaukskäämille määrätään myös mittauskäämin tarkkuusluokka, mutta ei avokolmiokäämille. Avokol- miokäämille suositellaan luokkaa 6P. Pelkästään vaimennuskäyttöön tarkoitettua avo- kolmiokäämiä ei koske tarkkuusvaatimukset.

Taulukko 5.4 Suojaus- ja avokolmiokäämien tarkkuusluokat virherajoiheen. [Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

| Tarkkuusluokka | Jännitevirhe \pm % | Kulmavirhe \pm min |
|----------------|----------------------|----------------------|
| 3P | 3,0 | 120 |
| 6P | 6,0 | 240 |

Luokan kirjain P symboloi suojausta (=protection), jolloin käy ilmi, että tarkoitetaan suojausmittamuuntajaa. Virherajat ovat voimassa jännitteen arvoilla $0,05 U_n \dots k_n U_n$ taakan vaihtelualueen ollessa sama kuin mittausmuuntajalla. Jännitteellä $0,02 U_n$ ovat virherajat kaksinkertaisia. Jännitemuuntajan muiden käämien kuormitus huomioidaan, kuten mittausjännitemuuntajilla. Relevalmistajat voivat edellyttää tarkemman luokan käyttöä relemallikohtaisesti. [Mörsky 1992; Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

5.4.2 Virtamuuntajat

Samoin kuin jännitteen, myös virran mittaukseen suoja- ja mittalaitteille, käytetään magneettista eli induktiivista muuntajaa. Virtamuuntajalta vaadittavat ominaisuudet riippuvat käyttötarkoituksesta; suojaus edellyttää suurien vikavirtojen tunnistamista oikein, kun mittaus asettaa tiukemmat tarkkuusvaatimukset. Tämän lisäksi ensiön virtojen vaihtelu kuormitusvirroista jopa satakertaisiin vikavirtoihin edellyttää erillisiä sydämiä ja toisiokäämejä mittaus- ja suojauspiireille. Kun virtamuuntajaa käytetään mittaukseen sekä suojaukseen, tulee kummankin vaatimukset huomioida. Tarkkuusvaatimukset huomioidaan sekä suojaukselle ja mittaukselle erillisillä tarkkuusluokilla käyttökohteen perusteella. Tarkkuusluokka ilmoittaa suoraan sallitun virtavirheen, joka yhdessä kulmavirheen kanssa, määräytyy magnetoimisvirran mukaan. Magnetoimiskäyrä ei ole suora, vaan virhe pienenee virran kasvaessa, kunnes saavutetaan kohta, jossa sydän alkaa kyllästyä, jolloin virhe lähtee kasvuun virran yhä kasvaessa.

Epäsymmetrinen virta, ja sen tasakomponentti, ovat ongelmallisia sydämen kylästymisen kannalta, jolloin virran toisto usein vääristyy varsinkin oikosulun alussa. Käytännössä ongelmaan voidaan hakea ratkaisua sydämen poikkipinnan ja ilmaraon mitoittamisella. Kyllästymistä edesauttaa remanenssi- eli jäännösvuo, joka jää kyllästä-mään sydäntä. Remanenssia syntyy käytössä oikosulkuvirtaa katkottaessa, mutta mahdollisesti jo ennen käyttöä. Remanenssin estämiseksi ennen käyttöönottoa, toimitetaan virtamuuntaja toisio oikosuljettuna ja sinetöitynä asennuskohteeseen. Asennuskohteessa varotaan remanenssin syntymistä, joka on mahdollista poistaa tarvittaessa vastamagne-toinnilla. Jos käytössä olevan virtamuuntajan toisiopiiri joudutaan avaamaan, täytyy virtamuuntajan toisioliittimet oikosulkea. [Mörsky 1992]

Standardi IEC 60044-1 määrittelee virtamuuntajille nimellisarvot. Terminen mitoitusvirta I_{th} on suurin ensiövirta, jonka lämpörasitukset mittamuuntaja kestää 1 sekun-nin ajan toisio ollessa oikosuljettu. Dynaaminen mitoitusvirta I_{dyn} on suurin ensiövirta, jonka sähköiset ja mekaaniset voimat virtamuuntaja kestää toisio ollessa oikosuljettu. Mitoitusensiövirralle I_{pn} on standardoitu arvot 10; 12,5; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 75 A sekä näiden kymmenpotenssikerrannaiset tai -osat. Suositellut arvot on alleviivattu.

Ensiön vaihtokytkentämahdollisuus ilmoitetaan esimerkiksi 50-100 A. Mitoitusensiövirta valitaan hieman nimellistä kuormitusvirtaa isommaksi. Sitä ei kannata ylimitoitaa, jottei mittarien ja releiden herkkyys kärsi, jolloin releiden tapauksessa asettelu vaikeutuu. Mitoitustoisiovirta I_{sn} on 1, 2 tai 5 A, joista keskimmäistä ei suositella. Lyhyillä etäisyyksillä käytetään 5 A, mutta pitkillä etäisyyksillä 1 A mittajohtimien taakan pienentämiseksi, jolloin on kuitenkin varauduttava toision suurempiin ylijännitteisiin.

Nimellistaakka S_n ilmoittaa toision suurimman kuormitettavuuden tarkkuusluokassaan. Kuormitusimpedanssin sijaan ilmoitetaan nimellistaakka impedanssin ja virran neliön tulona saatavana tehona (VA). Standardoidut arvot ovat 2,5; 5; 10; 15; 30 VA. Normaalisti muuntaja pysyy tarkkuusluokassaan taakan ollessa 25...100 % nimellistaakasta tarkkuuden ollessa parhaimmillaan noin 75 % taakalla. Tarkkuusluokka kertoo virtamuuntajan sallitun virta- ja kulmavirheen suuruuden taulukoissa 5.5 ja 5.6. Virtavirhe on toisiovirran ja toisiopuolelle redusoidun ensiövirran itseisarvojen suhteellinen ero. Kulmavirhe on toisiovirran ja toisiopuolelle redusoidun ensiövirran vaihekulmaero, joka on positiivinen toisiovirran ollessa ensiövirtaa edellä. Taulukoiden 5.5 ja 5.6 virheet on mitattu mitoitusensiövirralla ja mitoitustaakalla, jonka tehokerroin on 0,8 (ind) paitsi alle 5 VA taakalla, jolloin kerroin on yksi.

Taulukko 5.5 Mittausvirtamuuntajan tarkkuusluokat, kun I_p on ensiövirta. [Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

| Tarkkuusluokka | Virtavirhe \pm % | | | | | | Kulmavirhe \pm min | | | | |
|----------------|--------------------|------|------|-----|-----|-----|----------------------|------|-----|----|-----|
| | I_p/I_{pn} | | | | | | I_p/I_{pn} | | | | |
| | 0,01 | 0,05 | 0,2 | 0,5 | 1 | 1,2 | 0,01 | 0,05 | 0,2 | 1 | 1,2 |
| 0,1 | | 0,4 | 0,2 | | 0,1 | 0,1 | | 15 | 8 | 5 | 5 |
| 0,2 | | 0,75 | 0,35 | | 0,2 | 0,2 | | 30 | 15 | 10 | 10 |
| 0,2S | 0,75 | 0,35 | 0,2 | | 0,2 | 0,2 | 30 | 15 | 10 | 10 | 10 |
| 0,5 | | 1,5 | 0,75 | | 0,5 | 0,5 | | 90 | 45 | 30 | 30 |
| 0,5S | 1,5 | 0,75 | 0,5 | | 0,5 | 0,5 | 90 | 45 | 30 | 30 | 30 |
| 1 | | 3 | 1,5 | | 1 | 1 | | 180 | 90 | 60 | 60 |
| 3 | | | | 3 | | 3 | | | | | |
| 5 | | | | 5 | | 5 | | | | | |

Yllä mainitut virherajat ovat voimassa luokissa 0,1...1 taakan ollessa 0,25...1-kertainen mitoitustaakkaan nähden ja sitä suuremmissa luokissa 0,5...1-kertaisella taakalla mitoitustaakkaan nähden. Luokat 0,2S ja 0,5S ovat erikoisluokkia (S=special). Luokkien 0,1...1 virta-alueella on mahdollista laajentaa yläpäästä sillä edellytyksellä, ettei termien mitoitusvirta ylity ja virheet pysyvät 1,2-kertaisen nimellisvirran rajoissa.

Taulukko 5.6 Virtamuuntajan suojaussydämelle sallitut virherajat. ¹⁾ Linearisoidulla virtamuuntajalla 150 min. [Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

| Tarkkuusluokka | Virtavirhe \pm % | Kulmavirhe \pm min |
|----------------|--------------------|----------------------|
| 5P | 1 | 60 |
| 10P | 3 | - ¹⁾ |

Mittarivarmuuserroin F_s on mittausvirtamuuntajan ensiövirran I_p ja nimellisensiövirran I_{pn} suhde, kun mittausvirtamuuntajan virhe on tällä ensiövirralla ja nimellistaakalla vähintään 10 %. Yleisiä arvoja ovat 5 ja 10, vaikkakaan arvoja ei ole standardoitu. Mitä pienempi mittarivarmuuserroin, sitä paremmin virtamuuntaja suojaa siihen kytkettyjä mittareita. Tämä perustuu virtamuuntajan kyllästymiseen, jolloin toisiovirta ei juuriollenkaan suurene ensiövirran mukana. Tarkkuusrajakerroin on suojausvirtamuuntajan nimellisensiövirran kerroin, jolla suojausvirtamuuntaja pysyy tarkkuusluokassaan. Sen standardoidut arvot ovat 5; 10; 15; 20; 30. Tarkkuusrajakerroin määrää pitkälti suojausydämen koon. Kerrointa voidaan kasvattaa rautasydämen ilmarakoja lisäämällä, mitä kutsutaan linearisoimiseksi. Linearisoitu virtamuuntaja toimii oikein epäsymmetrisellä oikosulkuvirralla, mitä vaaditaan kohteissa, joissa suojaukseen tulee toimia nopeasti. Linearisoiminen vähentää myös remanenssivuota. [Mörsky 1992; Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

Magneettisesta virtamuuntajasta on käytön ja rakenteen mukaisia erityisratkaisuja, kuten kaapeli-, väli-, sekoitus- ja summavirtamuuntajat sekä virta-jännitemuuntaja. Virta-jännitemuuntaja on induktiivinen virtamuuntaja, jonka ensiövirta on enimmäkseen magnetoimisvirtaa, mikä synnyttää toisioon ensiövirtaan verrannollisen jännitteen. Toiosiossa on tällöin käytettävä jänniterelettä. Suuri magnetoimisvirta aikaansaadaan käyttämällä muuntajan rautasydämessä useita ilmarakoja. Sekoitusvirtamuuntaja on virtamuuntaja tai virta-jännitemuuntaja, jonka ensiön vaihevirrat sekoitetaan yhdeksi toisiojännitteeksi tai -virraksi. Vaiheille käytetään keskenään erilaisia muuntosuhteita erilaisten vikojen tunnistamiseksi. Eduksi muodostuu toision rakenne; tarvitaan kolmen sijasta vain yksi rele. Sekoitusvirtamuuntajia käytetäänkin apuyhteysvertoreleiden yhteydessä pienempien johdinhäviöiden takia suojauksen herkkyyden hieman kärsiessä. [Mörsky 1992]

Välivirtamuuntajalla voidaan muuttaa päävirtamuuntajan mittaaman virran suuruutta ja vaihekulmaa. Välivirtamuuntajilla saadaan esimerkiksi muuntajan ensiö- ja toisiovirrat keskenään vertailukelpoisiksi muuntajan differentiaalisuojaa varten. Toisena käyttökohteena voidaan virtaa pienentämällä pienentää toisiojohdinten taakkaa, mikäli taakka kasvaa suurilla etäisyyksillä liialliseksi. Summavirtamuuntajaksi kutsutaan välivirtamuuntajaa, joka summaa sille tuotavat virrat yhdeksi summavirraksi. Erillisen summavirtamuuntajan sijaan muodostetaan vaihevirtamuuntajista usein summakytkeä maasulkuvirran mittausta varten. Normaalitylityksessä summavirran tulisi olla nolla, joka ei käytännössä toteudu verrattain suurten vaihevirtojen ja virtamuuntajissa käytännössä aina ilmenevien keskinäisten erojen sekä kuormituserojen takia. Summakytkeä käytetään, kun maasulkuvirta on suuri tai kuormitusvirta pieni. [Mörsky 1992; Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

Kaapelivirtamuuntaja soveltuu hyvin kolmivaiheisen kaapelin pienten nollavirtojen mittaamiseen, minkä takia sitä käytetäänkin maasulkusuojauksessa. Kaapelivirtamuuntajassa joko kolmijohdinkaapeli tai erilliset yksijohdinkaapelit viedään sydänrenkaan läpi, jolloin kaapelien eristys muodostaa ensiön eristyksen. Toisio on käämitty renkaan ympärille. Kaapelivirtamuuntaja sijoitetaan tavallisesti kaapelipäätteen lähe-

syyteen. Mikäli kaapelin johtava suojavaippa tai -johdin viedään kaapelivirtamuuntajan läpi, tulee se tuoda päätteeltä sydämen läpi uudestaan ja yhdistää tämän jälkeen kojeiston maadoitukseen. Suojajohdin ei saa myöskään olla läpiviennin jälkeiseltä osaltaan missään muussa yhteydessä maahan tai maahan yhteydessä oleviin osiin. Näin estetään maasulkureleen virhetoiminta kaapelin suojavaipassa kulkevalla virralla. Kaapelivirtamuuntaja valitaan maasulkuvirtojen eikä kuormitusvirtojen mukaan. Sen avulla toteutettuna maasulkusuoja ei reagoi tarpeettomasti verkon käytössä esiintyviin suuriin kuormitusvirran heilahteluihin esimerkiksi muuntajien kytkentätilanteissa tai moottorien käynnistymisissä. Myös virhetoiminnot muualla verkossa tapahtuvien oikosulkujen takia vältetään. [Mörsky 1992]

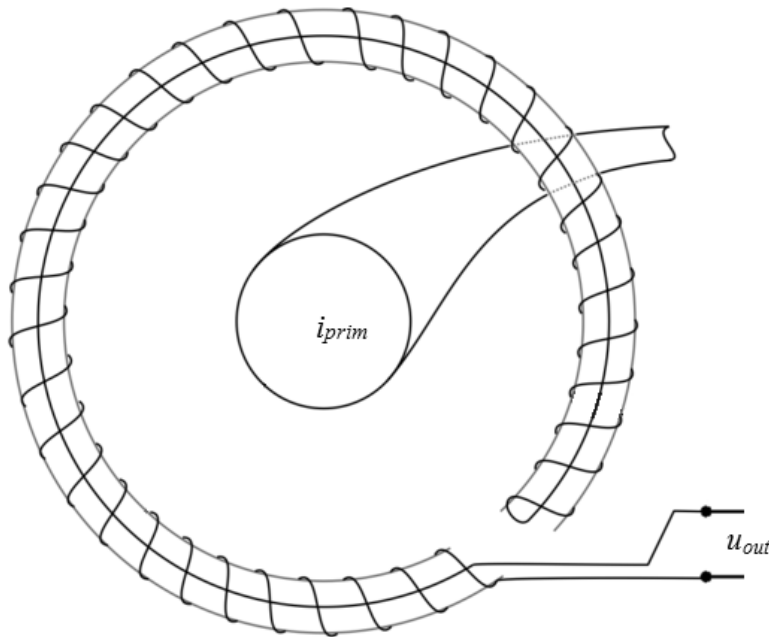
5.4.3 Uudet mittaustekniikat

Nykyään on kehitelty perinteisten mittamuuntajien rinnalle mitta-antureita. Esimerkiksi ABB on kehittänyt mitta-antureita 90-luvulta lähtien päästen laboratoriotilojen pienjännitemittauksista 100 kV jännitetasoon asti. Myynnistä löytyy jo noin 20 kV mitta-antureita. Mitta-antureilla pyritään pääsemään pienempään ja kompaktimpaan laitekoon, turvallisempaan käytettävyyteen ja toimintojen kehittymiseen. Anturit ovat suunniteltuja käytettäväksi nykyaikaisten releiden yhteydessä, jolloin ohjelmallisten korjauskertoimien avulla päästään entistä tarkempaan mittaukseen. Samoja anturielementtejä voidaan käyttää sekä mittaus- että suojaustarkoituksiin. Mitta-anturien käytössä huomioitettavia asioita ovat ympäristön sähkömagneettisten häiriöiden mahdollisuudet esimerkiksi keskijännitekytkinkojeistoissa [Niemelä 2010]. [Medium Voltage Products 2013]

Virta-anturi perustuu virtajohtimen ympärille laitettavaan Rogowskin kelaan, joka on esitetty kuvassa 5.3. Kelan ulostulo on virran muutokseen verrannollinen jännite

$$u_{out} = M \frac{di_{prim}}{dt}, \quad (38)$$

missä u_{out} on mittauksen ulostulojännite, i_{prim} mitattavan ensiöpiirin virta ja M kelan herkkyys. Tästä voidaan edelleen laskea virta.



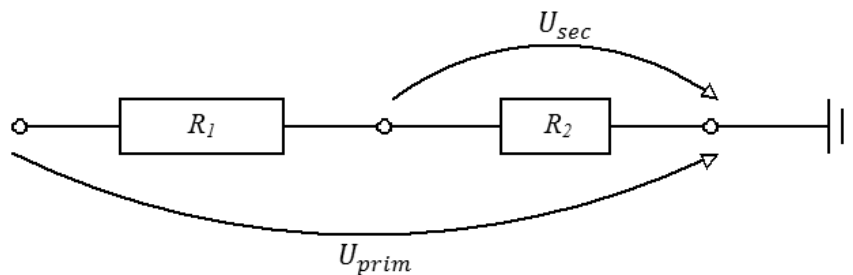
Kuva 5.3 Virran mittaus Rogowskin kelalla. [Niemelä 2010]

Rogowskin kelassa käytettyjen materiaalien ansiosta kela ei kyllästy suurillakaan virroilla, vaan kelan mittaustarkkuus pysyy samana läpi koko mittausalueen. [Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000; Indoor current sensor 2005; Niemelä 2010]

Jänniteanturit perustuvat vastuksilla R_1 ja R_2 mitoitettavaan resistiiviseen jännitteenjakoon, jonka periaate on esitetty kuvassa 5.4. Anturin ulostulojännite on riippuvainen mitattavan ensiöpiirin jännitteestä

$$U_{sec} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times U_{prim}, \quad (39)$$

missä U_{prim} on mittauksen ensiöjännite ja U_{sec} mittauksen toisiojännite. Jänniteantureilla mitataan vaihejännitteet, joista saadaan laskettua pääjännitteet sekä nollajännite.



Kuva 5.4 Resisttiivisen jännitteenjakajan mittauksen periaate. [KEVA 24 A Indoor voltage sensor 2012]

Jänniteanturi ei sisällä ferromagneettista sydäntä, jolloin vältetään virtamuuntajan kylästymiseen liittyneet epätarkkuudet ja kippivärähtelyn mahdollisuus. Jänniteanturi tarjoaa paremman mittaustarkkuuden laajemmalla mitta-alueella. Jänniteantureita käytetään joka lähdössä, kun jännitemuuntajia käytetään yleensä vain joka kiskostossa. [Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000, KEVA 24 A Indoor voltage sensor 2012]

6 SELEKTIIVINEN SUOJAUS

Suojareleet, yhdessä ohjaamiensa katkaisijoiden kanssa, muodostavat suojausalueita, joista muodostuu sähköjärjestelmän suojaus. Yksittäisiä suojausalueita ovat muun muassa johdot, muuntajat, generaattorit ja moottorit. Kun suoja kattaa vain alueensa, on se absoluuttisesti selektiivinen. Kun suojausalueet peittävät toisiaan, on suojaus aukoton. Suojausalue tulisi peittää viimeistään toisen suojan tarjoamalla varasuoja-alueella. Toisarvoisten kohteiden kohdalla varasuojaus voi jäädä toteutumatta. [Mörsky 1992]

Selektiivisyys voidaan muodostaa joissain tapauksissa releen mittaaman toimintasuureen perusteella, kuten ylivirtareleillä virran ja distanssireleillä impedanssin perusteella. Tällöin vikasuureiden tulee olla tarpeeksi erisuuria verkon eri suojausalueiden välillä. Aikaselektiivisyydessä kaksi suojarelettä havahtuu kumpikin vikasuureeseen, mutta lähin näistä toimii nopeamman toiminta-aikansa ansiosta. Lukitussuojauksista voidaan käyttää aikaselektiivisyyden sijaan, jolloin vikaa lähempänä oleva rele lukitsee kauemman releen toimimasta. Suuntareleillä voidaan tunnistaa vian sijainti, jolloin selektiivisyys perustuu suuntaan. Suuntasuojauksista käytetään pääasiassa rengas- ja silmukaverkossa selektiivisen ylivirtasuojauksen toteuttamiseen. Suunnattu ylivirtarele tunnistaa kummalla puolen suojarelettä vika on, jolloin suoja voidaan asettaa toimimaan halutunlaisesti. Toinen käyttösovellutus on maasulkusuojauksessa. Suppeassa verkossa vaihtelevissa kytkentätilanteissa ei välttämättä voida toteuttaa selektiivistä maasulkusuojauksista maasulun virtareleillä, vaan joudutaan käyttämään maasulun suuntarelettä. Paikalliset suojat, kuten differentiaalisuojat ja valokaarisuojat toimivat vain suojausalueensa vioissa. [Mörsky 1992; Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

6.1 Oikosulkusuojauksen toteuttaminen

Suppean säteettäisen verkon oikosulkusuojaus voidaan toteuttaa ylivirtareleillä virta- ja aikaselektiivisyyttä noudattaen ja lukitusten avulla. Releasetteluissa tulee huomioida verkon eri osien pienimmät ja suurimmat mahdolliset vikavirrat, normaalissa käytössä ilmenevät kuormitusvirrat ja virtasysäykset sekä komponenttien oikosulkukestoisuudet.

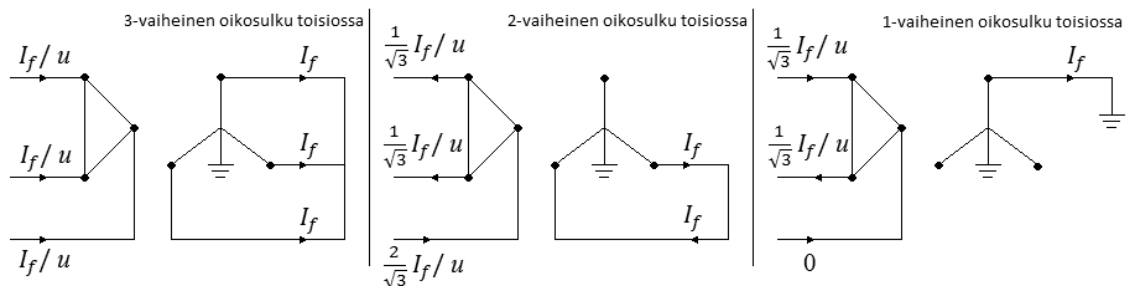
6.1.1 Moottorilähdön suojaus

Moottorilähdöissä on huomioitava moottorin käynnistysvirta. Suoraan verkkoon käynnistettävien tahtimoottorien käynnistysvirta on noin 3...4-kertainen ja oikosulkumoottorien noin 5...7-kertainen nimellisvirtaan nähden. Virta pysyy liki main vakiona käynnistuksen ajan, joka riippuu moottorin kuormasta ja jännitteestä. Käynnistysaika lähes kaksinkertaistuu 80 % alijännitteellä käynnistettäessä. Moottorilähdön oikosulkusuojauk-

seen riittää pelkkä pikalaukaisuporraskin. Ylivirtareleen pikalaukaisu voidaan asettaa tarpeeksi käynnistysvirtaa suuremmaksi, kuitenkin niin, että laukaistaan moottorissa tai syöttävässä kaapelissa sattuvat oikosulut. Hidasta porrasta voidaan käyttää moottorin ylikuormitussuojana käynnistystilanteissa asettamalla virta 2...3-kertaiseksi moottorin nimellisvirtaan nähden ja hidastus hieman käynnistysaikaa pidemmäksi. Käynnistystapahtuma on mietittävä moottorikohtaisesti suojausasetteluissa. [Mörsky 1992; Huotari 1998]

6.1.2 Muuntajälähdön suojaus

Muuntajälähdön ylivirtareleellä suojataan ensisijaisesti muuntajan syöttöjohtoa sekä ensiötä ja toissijaisesti toisiota. Tällöin ylivirtarele asetellaan ainakin kaksiporlaiseksi niin, että syöttöjohdon ja ensiön oikosulut pikalaukaistaan. Hidastettu laukaisu toimii toision vioissa sekä varasuojana PJ-syöttösuojan takaiselle kiskostolle. [Mörsky 1992] Toissijaisesti voidaan pikalaukaisulle asettaa esimerkiksi 0,3 s viive ja ulottaa laukaisu alajännitepuolelle. Tällöin suojaus on aikaselektiivinen alajännitepuolen pikalaukaisun kanssa. Haittana on hitaampi laukaisu muuntajan ensiöpuolen viassa. [Huotari 1998] Dyn-kytkentäryhmäisen muuntajan kohdalla tulee huomioida toision epäsymmetristen vikavirtojen näkyminen ensiöpuolella kuvan 6.1 mukaisesti.



Kuva 6.1 Dyn-kytkentäisen muuntajan toisiossa sattuvan oikosulun näkyminen ensiön puolella. I_f on oikosulkutapauksesta riippuva vikavirta ja u on muuntajan ensiön ja toision välinen muuntosuhde. [Huotari 1998]

Yksivaiheisen oikosulun tapauksessa tämä voidaan tehdä normaalin muuntosuhteella u redusoinnin lisäksi kertomalla toision vikavirta arvolla $1/\sqrt{3}$. Myös kaksi- tai kolmivaiheista oikosulkuvirtaa mitattaessa vain kaksivaiheisesti pätee sama tilanne. [Huotari 1998; Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000] Mikäli KJ-lähtösuojan tulee toimia myös PJ-keskuksen ensisijaisena oikosulku- ja ylikuormitussuojana, tulisi hitaan portaan havahdusta vähintään kaksinkertaisella jakelumuuntajan nimellisvirralla, sillä standardi IEC 60354 ei suosittele tämän rajan ylitystä edes hetkellisestikään. [Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

Epätahtimoottorin käynnistysvirtasysäystä muistuttavat muuntajien kytkentävirrasysäykset kytkettäessä muuntajaa verkkoon. Sysäys on suurimmillaan jännitteetöntä muuntajaa kytkettäessä. Jännitteisen muuntajan pysyvän tilan jännitteen ja magneettivuon välinen vaihesiirtokulma on noin 90 astetta. Jännitteettömän muuntajan vuo on liki nolla, joten kytkettäessä muuntajaa verkkoon vuo lähtee nousemaan epäsymmetrisesti ensimmäiseen huippuarvoon, joka on noin kaksinkertainen pysyvän tilan huippu-

arvoon nähden. Tällöin muuntajan sydämen kyllästyessä, nousee magnetoimisvirta jyrkästi. Pysyvä tila saavutetaan virran vaimentuessa piirin resistanssissa. [Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000] Taulukossa 6.1 on joitain keskimääräisiä arvoja mitatuista kytkentävirtasysäyksistä.

Taulukko 6.1 Mitattuja muuntajan kytkentävirtasysäysarvoja. [Mörsky 1992]

| Muuntajan teho | Muuntajan kytkentävirta | | Virran puolittumisaika |
|----------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| | Syötön kytkentä ylijännitenapoihin | Syötön kytkentä alijännitenapoihin | |
| MVA | xI_n | xI_n | s |
| 1 | 7 | 12 | 0,1-0,2 |
| 5 | 5 | 9 | 0,2-0,5 |
| 10 | 4 | 8 | 0,5-1 |
| 50 | 3,5 | 7,5 | 1,2-7,2 |

Tarkkoja arvoja ei voida määritellä suureiden riippuessa monesta tekijästä. Virran huippuarvoon vaikuttavat kytkentähetken vaihekulma, käämikytkimen asento, rautasydämen jäännösvuo, muuntajan ja verkon rakenne. Vaimenemisaikaan vaikuttaa muuntajan reaktanssin ja resistanssin suhde. Kytkentävirtasysäys voi näkyä verkon muissakin muuntajissa. Tämä johtuu kytkettävän muuntajan tasavirran kulkeutumisesta toiseen muuntajaan.

Kytkentäsysäysvirta aiheuttaa usein hetkellisen laukaisun sijasta hidastetun laukaisun virhetoiminnon, koska virran vaimeneminen voi kestää pitkään. Taulukkoon 6.2 on koottu erään näkemyksen mukaisia releasetteluarvoja, joilla voidaan huomioida kytkentävirtasysäys eritehoisilla muuntajilla.

Taulukko 6.2 Muuntajalähdön ylivirtareleen virta-asettelun vähimmäisarvot muuntajien lukumäärän ja nimellistehon mukaan 6 kV jännitetasossa [Teollisuuden sähköverkot 2 1985].

| Muuntaja | | Hetkellinen laukaisu 0,05 s | | Hidastettu laukaisu 0,3 s | |
|-----------|--------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|
| lukumäärä | nimellisteho S_N | Elektroninen rele | Mekaaninen rele | Elektroninen rele | Mekaaninen rele |
| kpl | MVA | A | A | A | A |
| 1 | 0,5 | 217 | 367 | 33 | 67 |
| 1 | 0,7 | 283 | 500 | 67 | 117 |
| 1 | 1 | 400 | 700 | 133 | 217 |
| 1 | 2 | 767 | 1333 | 367 | 633 |
| 2 | 2 | 1550 | 2683 | 733 | 1267 |
| 1 | 3,15 | 1183 | 2050 | 683 | 1167 |
| 2 | 3,15 | 2367 | 4100 | 1350 | 2333 |
| 1 | 5 | 1817 | 3150 | 1200 | 2083 |
| 2 | 5 | 3633 | 6300 | 2400 | 4150 |

Liitteessä 1 on laajempi taulukko, jossa on 6 kV arvojen lisäksi 10 kV ja 20 kV verkkoon redusoidut arvot. Mikroprosessorireleillä voidaan tunnistaa ja huomioida kytkentävirtasysäys hetkellislaukaisun kohdalla. Tunnistus perustuu kytkentävirtasysäyksessä ilmenevään virran toiseen harmoniseen yliaaltokomponenttiin. Esimerkiksi ABB SPAJ 141C-releellä voidaan kytkentävirran tunnistus ottaa käyttöön, jolloin hetkellisen virtalaukaisun arvo kaksinkertaistetaan automaattisesti [SPAJ 141 C 2002]. [Mörsky 1992]

6.1.3 Jakeluverkon suojaus

Säteettäisen keskijännitejakeluverkon suojaus voidaan toteuttaa ylivirtareleillä virta- tai aikaselektiivisesti sekä lukitussuojauksen avulla. Virtaselektiivisyys perustuu vikavirran tuntemiseen verkon eri kohdissa sattuvissa vioissa. Kun tiedetään seuraavan suojan takana esiintyvä suurin mahdollinen vikavirta, voidaan suojausalueen virta-asettelu tehdä niin, ettei se missään tapauksessa ulotu seuraavan suojan takana tapahtuviin vikoihin. Suojaus ei ole tällöin aukoton, joten se tarvitsee varasuojauksen. Virtaselektiivisen suojauksen edellytyksenä ovat verkon oikosulkuimpedanssierot, joita muodostuu pitkillä johdoilla, muuntajilla ja kuristimilla. [Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000; Huotari 1998]

Lyhyillä johdoilla esimerkiksi teollisuusverkossa vikavirtaerot ovat pienet verkon eri osien välillä. Tällöin ei virran suhteen voida porrastaa suojauksen toimintaa eri suojausalueiden välillä. Tällöin jää mahdolliseksi suojien väliset hidastukset aikaselektiivisesti. Aikaselektiivisyys on yksinkertainen tapa toteuttaa selektiivisyys suojauksessa. Sen perusidea on porrastaa releiden toiminta-aikoja niin, että lähimpänä vikaa olevalle releelle asetetaan lyhin toiminta-aika. Toisin sanoen syöttösuunnasta katsoen viimeisin rele toimii järjestyksessä ensin.

Peräkkäisten suojaportaiden toiminta-aikojen erotusta kutsutaan porrassajaksi, jonka oikea valinta on aikaselektiivisyyden edellytys. Vikavirran muutosilmiöt sekä mittamuuntajien virheet ja epätarkkuudet aiheuttavat suojauksen toimintaan viivettä, joka on syytä huomioida porrassaikaan lisättävällä varmuusmarginaalilla. Toisaalta selektiivisyyden varmistamisen lisäksi on huomioitava, ettei porrassaikojen kasvattaminen hidasta liikaa ketjun ensimmäisen releen toiminta-aikaa oikosulkuvirtojen ollessa sen toiminta-alueella suurimpia. Käänteisaikaisilla releillä virran mittauksen epätarkkuuden vaikutus toiminta-aikaan joudutaan yleensä huomioimaan pidemmällä porrassajoilla kuin vakioaikaisilla releillä. Yleisesti käytetään seuraavia porrassaikoja releiden välillä: 0,15 s numeeriset, 0,3 s staattiset ja 0,5 s mekaaniset [Huotari 1998]. Käytettäessä samanlaisia numeerisia releitä, joiden oletetaan havahtuvan samanaikaisesti, voidaan porrassaika määrittää yhtälöstä (40)

$$\Delta t_{DT} = 2 \cdot t_E + t_R + t_{CB} + t_M, \quad (40)$$

missä t_E on releen toiminta-ajan toleranssi, t_{CB} katkaisijan toiminta-aika, t_R retardaatioeli pyörtöaika ja t_M varmuusmarginaali. Mikäli releet eivät ole samanlaisia, huomioidaan kummankin releen toiminta-ajan toleranssi erikseen ja retardaatioaikana käytetään viasta kauemman releen retardaatioaikaa. Retardaatioaika, joka ilmoitetaan etenkin vanhemmilla releillä palautumisaikana, kuvaa jälkimmäisenä toimivan releen palautumis-

nopeutta. Katkaisijan toiminta-ajalla tarkoitetaan vikaa lähemmän katkaisijan kokonais-toiminta-aikaa, joka koostuu katkaisijan oma-ajasta eli aukikytkeäajasta sekä valokaa-ren sammumiseen kuluva ajasta huomioiden toleranssit. Varmuusmarginaaliksi riittää usein vaihtovirran jakson aika, kun suojausketjun virtamuuntajat kyllästyvät samanai-kaisesti. Marginaalia on syytä kasvattaa, mikäli virtamuuntajien toistokyvyissä on eroa, jolloin oikosulkuvirran DC-komponentti aiheuttaa toisessa releessä suuremman havahtumisviiveen. Myös erilaisten releiden välillä havahtuminen voi tapahtua eriaikaisesti. [Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

Lukitussuojausta voidaan käyttää aikaporrastamisen sijaan, jolloin toimintaviiveet eivät kasva niin suuriksi suojausketjun alkupäässä. Perinteisin sovellus on kojeiston lähtösuojen ja syötön suojan väliset lukitukset, jolloin lähtörele estää syöttörelettä toimimasta lähdöllä tapahtuvassa viassa. Kun vika sattuu syötön suojausalueella eli kojeiston kiskostossa, ei lukitusta tapahdu, ja syöttörele poistaa vian. Lukituksen yhteydessä on erityisesti huomioitava mahdollinen takasyöttö lähdöltä, ettei lähdön kiskostoon päin syöttämä vikavirta ylitä lähtöreleen virta-asettelua ja lukitse syöttörelettä virheellisesti. Tämä tosin tulee huomioida ilman lukitustakin, jottei tule turhia laukaisutoimintoja. Lukittavan suojan laukaisua on syytä hieman hidastaa, jotta varmistetaan lukituskäskyn ehtiminen perille. Tähän viiveasetukseen vaikuttavat reletyyppien ominaisuudet, virtamuuntajien toistokyky sekä lukituksen tekninen toteutus. Viivettä voidaan arvioida huomioimalla lukitsevan suojan havahtumisaika sisältäen sekä havahtumisviiveen että lähtöreleen toimintaviiveen. Lukittavan suojan kohdalla on huomioitava sisäänmenopiirien vasteaika sekä retardaatio- eli pyörtöaika. Ajat yhteen laskemalla saadaan lyhin mahdollinen aika-asettelu lukitulle portaalte. Kun lukituspiiri ei sisällä erillisiä apureleitä, asetteluna voidaan käyttää 0,1 s. Lukitussuojausta voidaan oikein aseteltuna luonnehtia absoluuttisesti selektiivisesti, jolloin se ei ulotu seuraavan suojan taakse toimien vain oman alueensa vioissa. Tämän vuoksi täytyy sen lisänä olla aikaselektiivinen suojaus esimerkiksi hidastetun portaan muodossa tarjoamassa lähtösuoille varasuojaa. [Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

6.2 Maasulkusuojauksen toteuttaminen

Maasta erotetun verkon missä tahansa osassa sattuva maasulku voidaan tunnistaa nollajännitteestä. Nollajännitesuojaa voidaanakin käyttää yleishälytyksenä, varasuojana muille maasulkusuoille ja herkkänä maasulkusuojana. Selektiivinen maasulkusuojaus vaatii lähtökohtaisia nollavirran mittaukseen perustuvia maasulun ylivirtareleitä tai nollavirran ja nollajännitteen perusteella toimivia maasulun suuntareleitä. Maasulkusuojauksella voidaan varmistaa myös suuren vikaresistanssin kaksoismaasulkujen laukaisu, mikäli oikosulkusuojaus ei havaitse kaksoismaasulkua. [Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

6.2.1 Yleishälytys

Suppeassa verkossa yksivaiheiseen maasulkuun riittää yleishälytys, jonka perusteella vikapaikka pystytään selvittämään riittävän nopeasti. Yleishälytys saadaan kiskoston

jännitemuuntajien avokolmiokytkennästä nollajännitereleenä toimivalta vakioaikatoimiselta ylijännitereleeltä. Nollajännitereleellä voidaan tunnistaa suurenkin vikaresistanssin viat tarpeeksi alhaisella asettelulla, jonka mahdollistaa kaapeliverkon yleensä vain alle prosentoin luokkaa oleva epäsymmetria terveessä tilassa. Toisaalta suuriresistanssiset viat ovat harvinaisia kaapeliverkossa. Nollajännite ilmenee koko päämuuntajan syöttämässä verkossa, joten vikaantunut lähtö joudutaan paikantamaan. [Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

6.2.2 Lähtökohtainen suojaus

Lähtökohtaisesti maasulku voidaan tunnistaa suunnatulla tai suuntaamattomalla nollavirtareleellä. Vaiheiden välisen summavirran eli nollavirran mittaaminen onnistuu parhaiten kaapelivirtamuuntajalla. Nollavirtareleen mittaama virta lähdöllä tapahtuvassa maasulussa on taustaverkon syöttämä maasulkuvirta

$$\sum I_v = \frac{C_0 - C_{0j}}{C_0} I_{ef}, \quad (41)$$

kun C_{0j} on viallisen lähdön yhden vaiheen maakapasitanssi. Kullekin johdolle voidaan laskea johdon jäykässä maasulussa tuottama maasulkuvirta I_{ej} kaavalla (34) sijoittamalla C_0 tilalle C_{0j} . Yhtälön (34) I_e voidaan siis laskea vaihtoehtoisesti yhteen laskemalla kunkin johdon I_{ej} . Tällöin yhtälö (41) voidaan esittää muodossa

$$\sum I_v = \frac{I_e - I_{ej}}{I_e} I_{ef} \quad (42)$$

Taustaverkon maasulkuvirta on suorassa maasulussa siis verkon tuottama maasulkuvirta vähennettynä lähdön itsessään tuottamalla maasulkuvirralla. Tämä virta määrää nollavirtareleen virta-asettelun ylärajan, jotta rele toimisi edes lähtönsä jäykässä maasulussa. Suuntaamattoman virtareleen toiminta perustuu ainoastaan nollavirran suuruuteen, joten virta-asettelun alarajan tulee olla suurempi kuin I_{ej} . Muutoin rele toimii virheellisesti muualla verkossa tapahtuvassa jäykässä maasulussa.

Suunnattu maasulkurele tunnistaa vian sijaintisuunnan nollavirran ja jännitteen vaihekulmaan perustuen. Suuntarele toimiikin vain lähtönsä yksivaiheisessa maasulussa, jolloin virta-asettelun alarajaa ei varsinaisesti ole. Suuntareleen etuna onkin toiminnan säilyminen verkon kytkentätilanteiden vaihdelleessa enemmän ja mahdollisuus releen herkkään asetteluun suuriresistanssisten vikojen tunnistamiseksi. [Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

6.2.3 Kaksoismaasulku

Saman lähdön eri vaiheiden välille syntyvässä kaksoismaasulussa vaiheissa kulkevat suuret vastakkaismerkkiset virrat, jotka laukaisevat oikosulkusuojan, kun vikapiirin resistanssi on tarpeeksi pieni. Sen sijaan lähdöltä mitattava nollavirta sekä nollajännite ovat pienempiä kuin yksivaiheisessa maasulussa etenkin pienellä vikaresistanssilla. Oikosulkusuojaus toimii myös eri lähtöjen välisessä kaksoismaasulussa, mikäli vikapiirin resistanssi ei kasva liikaa. Nyt summavirrassa vaikuttaa myös oikosulkuvirtakomponentti, joten nollavirtarele havahtuu herkemmin kuin yksivaiheisessa maasulussa. Sa-

man lähdön kaksoismaasulun laukaisu voidaan varmistaa riittävän pienellä nollavirtareleen asettelulla. Erikseen voidaan asetella nopea porras toimimaan vain eri lähtöjen kaksoismaasulussa asettelemalla virta suoran yksivaiheisen maasulun taustaverkon virtaa suuremmaksi. Suuntareleillä eri lähtöjen viassa summavirran ja nollajännitteen välillä vallitseva erilainen vaihesiirto häittää toisen suuntareleen toimintaa, mutta toinen suuntarele toimii kuitenkin oikein, jolloin vika palautuu yksivaiheiseksi. Varsinkin tämän vuoksi maasulkusuoja tulee asetella oikosulkusuoja hitaammaksi, jotta vika poistuisi kokonaan. [Mörsky 1992; Teknisiä tietoja ja taulukoita 2000]

7 KOHDEYRITYKSEN SÄHKÖVERKKO

UPM on biometsäteollisuusyhtiö, joka jalostaa uusiutuvia ja kierrätettäviä raaka-aineita. Liikevaihto oli vuonna 2012 10,4 miljardia euroa. Tuotantoa UPM:llä on 17 maassa myyntiverkoston ollessa maailmanlaajuinen. UPM työllistää suoraan noin 22 000 työntekijää, ja vuoden 2012 lopussa sen osakkeita omisti 97 255. UPM:n liiketoiminta-alueet ovat energia (2 %), sellu (8 %), metsä ja sahat (7 %), paperi (67 %), tarrat (12 %), vaneri (4 %) ja muu toiminta (<1 %), joiden keskinäistä suhdetta kuvaa liikevaihdon osuus, joka on ilmoitettu sulkeissa kunkin liiketoiminta-alueen kohdalla. Liiketoiminta-alueista kannattavimpia ovat energia ja sellu liikevoiton kannalta määriteltynä. [UPM vuosikertomus 2012, s. 2]

7.1 UPM Rauman tehdas

Rauman tehdasalueen historia alkaa 1900-luvun alusta, minkä jälkeen tehtailla on ollut monta omistajaa. Vuojoki Gods Ab käynnisti teollisen toiminnan tehdasalueella sahan muodossa vuonna 1912, jolloin tehtaasta tuli merkittävä työnantaja. Vuonna 1920 käynnistyi sellutehdas. Alueella toimii myös telakka, joka nykyisellään on erillään muusta tehdasintegraatista eri omistajan alla. Raumalaiset muistavat tehtaan omistajana varsinkin Rauma-Repola Oy:n, jonka omistajuus kesti lähes 40 vuotta, ja jonka aikana paperin tuotanto käynnistettiin 1960-luvun lopulla.

UPM-Kymmene Oyj on toiminut Rauman tehtaan omistajana vuodesta 1996 lähtien. Suomen uusiin paperikone PK4 käynnistyi vuonna 1998, jolloin valmistui myös uusi pakkaamo. PK4 on samalla myös Suomen uusiin ja tuotantokapasiteetiltaan (400 000 t/a) suurin paperikone. Paperikoneita on moneen otteeseen uusittu viimeisten uudistusten tapahtuessa PK1:n kohdalla vuonna 2003 ja PK2:n kohdalla vuonna 2004. Vuonna 1980 käynnistetyn PK3:n tuotanto lakkautettiin keväällä 2013 ja kone purettiin syksyllä 2013. [Tuuri 1999; Rauman metsäteollisuuden aikajana 2014]

Nykyisellään tehdasintegraattiin kuuluvat kolme paperikonelinjaa, revintämassalinja, kaksilinjainen kuorimo, kaksi hiomoa, kaksi kuumahierrelaitosta, vesilaitos ja biologinen jätevesipuhdistamo. Mekaanisen hiokkeen ja kuumahierteen lisäksi paperin valmistukseen käytetään kemiallista sellua, jota saadaan Sampaanalalanlahden toiselta puolelta Metsä Fibren sellutehtaalta lahden yli rakennettua kuljetinlinjaa pitkin. Lisäksi tehtaalle tuodaan sellua kauempaa. Paperin valmistukseen käytetään vuodessa yli 1,3 miljoonaa kuutiota kuusipuuta ja 165 000 tonnia sellua.

Nykyisellään paperikoneet valmistavat päällystämätöntä (SC) sekä päällystettyä (LWC) aikakauslehtipaperia, jota käytetään aikakauslehdissä, myyntikuvastoissa ja mainospainotuotteissa. SC-paperia valmistaa PK2 ja LWC-paperia PK1 ja PK4 ja nii-

den yhteistuotantokapasiteetti on 1 000 000 t/a. RaumaCell:n kuivaamolinja valmistaa fluff-sellua eli revintämassaa 150 000 t/a kapasiteetilla, jota käytetään hygieni- ja kattaustuotteiden valmistuksessa. Lisäksi tehtaalla toimii biovoimalaitos, jota hallinnoi Rauman Biovoima Oy. Voimalaitos käyttää raaka-aineenaan paperin valmistuksessa syntyviä sivutuotteita, joista se tuottaa prosessihöyryä ja sähköä tehtaan tarpeisiin. Osa sähköstä ja kaukolämpöä viedään Rauman kaupungille. Jätevesilaitos puhdistaa lisäksi sellutehtaan ja Rauman kaupungin jätevedet. Tehtaan työntekijöitä on noin 580, minkä lisäksi tehtaalla toimii sekä jatkuvia että satunnaisia aliurakoitsijoita. [Rauma esittely 2014]

7.2 Sähkönjakelun rooli tehtaan tuotannossa

Sähkönjakelulle varataan oma vuosibudjettinsa tehtaalla. Budjetin ehdoilla pyritään sähkönjakelujärjestelmää huoltamaan ja kehittämään turvallisuuden ylläpitämiseksi ja vikojen ennaltaehkäisemiseksi. Sähkön siirto ja jakelu tehdasalueella ei sinänsä ole markkinoitava hyödyke, jota myytäisiin, vaan sitä käytetään paperin tuotannon hyödykkeenä. Tämän vuoksi ei ole taloudellisesti järkevää ylimitoittaa sähkönjakelujärjestelmää sekä sen huoltoa ja uudistamista, vaan pitää järjestelmä kunnossa tuotannon ja turvallisuuden määräämin ehdoin. [Ahonen 2013]

Sähkölaitteista moottorit ovat lukumääränsä, vaihtelevien kuormitustilanteiden ja rajallisen elinikänsä takia useimmin vikaantuva laite. Sähköverkon oikosulkuviat eivät ole kovin yleisiä tehtaalla, mutta niistä voi aiheutua pitkään tuotannon pysähtyminen. Pienjänniteverkkoa lukuun ottamatta oikosulkuvikoja ei esiinny välttämättä vuosittainkaan. Varsinkin keskijänniteverkon maasulkuviat olivat aiemmin yleisempiä, mutta nykyisin niitä ei esiinny välttämättä vuosittainkaan. Verkkoa ja kaapeleita on uusittu, jonka ansiosta viat ovat vähentyneet ja niiden merkitys on laskenut tehtaan sähkön jakelussa. Maasulkuvikoja esiintyy pääasiassa moottoreissa ja vanhoissa kaapelipäätteissä, joiden määräaikaisella lämpökuvauksella pystytään viat tunnistamaan usein ennakoivasti. Useammin toistuva haitta tuotannolle ovat valtakunnan verkossa kesäisin ukkosista aiheutuvat jänniteheilahtelut, jotka pudottavat herkän paperikoneprosessin toiminnasta aiheuttaen tuotannon katkeamisen. Tosin ukkosien aiheuttamat häiriöt ovat nekin vähentyneet muutama vuodessa sen jälkeen, kun 110 kV syöttöyhteys lyheni Ulvilan sähköasemalta Rauman sähköasemalle. [Ahonen 2013, Pitkänen 2013]

Keskijänniteverkkoa käytetään jakelujärjestelmän lisäksi joidenkin moottorien syötössä. Henkilökunta on varsin tarkasti mitoitettu, ja kun verkkoa uudistetaan ja laajennetaan jaksottaisesti tarpeen ilmetessä, korostuu ulkopuolisten alihankkijoiden työn osuus. Ajoittain tai tarpeen mukaan tehtäviin suunnittelu-, huolto- ja korjaustöihin ja rakentamiseen ei ole välttämättä tarkoituksenmukaista hankkia omaa osaamista ja resursseja. Sen sijaan prosessin vaatimat käyttötoimenpiteet ja verkon kytkentätilanteet toteutetaan omalla henkilöstöllä, jossa paikallinen asiantuntemus toimii etuna. [Ahonen 2014]

7.3 Tehtaan sähköverkko

Tehtaan sähköverkko koostuu kantaverkkoon liittynästä, tehon siirrosta 110 kV alueverkossa, keskijännite- ja pienjännitejakeluverkoista ja niihin kytkeytyvästä kuormasta ja tuotannosta. Keskijännitteeseen liittyvät voimalaitoksen generaattorit ja tehtaan suurimmat moottorit. Omaan tuotantoon kuuluvat voimalaitoksen höyrykattilan HK6 päägeneraattori noin 90 MVA ja höyrykattilan HK5 varageneraattori noin 30 MVA nimellistehoilla. Sähkön tuotannolla katetaan ainoastaan osa tehtaan energian tarpeesta eikä koko tehdasverkon saarekekäyttö ole mahdollista. Keskijännitemoottoreista suurimpia ovat massan valmistuksen tahtikoneet hiomossa 7 kpl noin 6,5...10 MW/kone ja kuumahierre- eli TMP-laitoksissa 14 kpl noin 8,5...20 MW. Paperikoneen tyhjöjärjestelmissä on suorakäyttöisiä 500...1000 kW oikosulkumoottoreita. Keskijännitekojeistoja on noin 30 ja jakelumuuntajia noin 180 kpl. Pienjännitteellä kuorma muodostuu enimmäkseen massan ja veden pumppauksen taajuusmuuttajakäyttöisistä moottoreista sekä paperi- ja jälkikäsittelykoneiden tasa- ja vaihtovirtaisista linjakäytöistä. [Tutkintotyö 2013]

7.3.1 110 kV alueverkko

Tehon siirto tapahtuu tehdasalueella kahden 110 kV kytkinkentän syöttämän alueverkon välityksellä, jota syöttää valtakunnan verkon lisäksi oma voimalaitos. Kantaverkkoon liittyään kahdella ilmajohdolla Rauman sähköasemalla noin 300 MW liittymisteholla. Liittymisjohdot kulkevat vierekkäin avojohtoina 8 km reitin 2A-kytkinkentälle. Kytkinkentän kaksoiskisko-apukisko- eli KKA-järjestelmästä syötetään osaa tehdasta suoraan, uudempaa 3A-kytkinkenttää sekä Metsä Fibren sellutehdasta avojohdolla.

3A-kytkinkentän kisko-apukisko- eli KA-järjestelmästä syötetään suurinta osaa tehtaan päämuuntajista sen läheisemmän sijaintinsa takia. Siihen liittyvät myös voimalaitoksen generaattorit muuntajien välityksellä. Kaikkiaan tehtaalla on 14 päämuuntajaa, joista yksi on päägeneraattorin blokkimuuntaja ja loput syöttävät tehoa keskijänniteverkkoon. Muuntajista kaksi on kolmikäämimuuntajia: M4 (110/20/6 kV) ja 8TC41 (110/10/10 kV). Kummatkin kytkinkentät ovat tehtaan ulkopuolelle aidattuja ulkokytkinkenttiä, joissa käytetään ukkossuojausta suoria salamaniskuja vastaan. Samoin liittymisjohdoilla käytetään ukkosköysiä. Lisäksi 110 kV puolella käytetään ylijännitesuojia muun muassa päämuuntajien läheisyydessä estämään ulkopuolisesta verkosta kulkeutuvia ylijännitteiden pääsyä tehtaan verkkoon.

7.3.2 Keskijänniteverkko

Tehdasalueen pääasiallinen sähkön jakelu tapahtuu kolmessa jänniteportaassa, jotka ovat 6, 10 ja 20 kV. Varayhteyksiä on vaihtelevasti. Verkkoja käytetään säteittäisesti poikkeuksena voimalaitoksella varageneraattorin omakäyttökojeisto, jota syötetään kahdella rinnakkaisella kuristimella. 20 kV verkko on peruja ajalta ennen paperitehdasta, ja siihen kuuluu prosessin kannalta ainoastaan jätevesilaitos. Kolmikäämimuuntaja

M4:n 20 kV toisiosyöttämä niin sanottu vanha kytkinkenttä sisältää yhä olemassa olevat yhteydet telakan verkkoon, joka aikanaan muodosti laajimman osan alueen keskijänniteverkosta. Jätevesilaitokselle on varayhteydet Rauman energian sekä Metsä Fibren verkoista.

Paperitehtaiden rakentamisesta uusimpaan paperikoneeseen asti rakennettiin kojeistot 6 kV jännitteelle. Tämä tarkoittaa sitä, että suurin osa tehtaan keskijännitejake- lusta tapahtuu vieläkin kyseisellä jännitteellä. 6 kV verkko kattaa kantatehtaan sekä samaan aikaan rakennettujen laitosten sähkönjakelun. Tähän sisältyy PK1, PK2, hiomot, HK5, kuorimo, vesilaitos ja kuivaamo. Pakkaamo syöttää kaksi jakelumuuntajaa, joista toinen saa PK4:n puolelta 10 kV jännitteen ja toinen PK2:n puolelta 6 kV jännitteen. 1990-luvun lopulta lähtien on uusien päämuuntajien toisiojännitteeksi valittu 10 kV. Suurempi jännitetaso aiheuttaa vähemmän jännitehäviöitä johtimissa. Eduksi muodostuu myös se, että yhteen lähtöön voi pääsääntöisesti kytkeä kaksi jakelumuuntajaa, jolloin tosin selektiivisyys kärsii. 10 kV jakeluun kuuluu PK4 ja TMP3/4. Uusimman HK6:n generaattorijännite on myös 10 kV.

Keskijänniteverkon kuormitus koostuu moottoreista ja jakelumuuntajista. Suurimmat keskijännitteiset moottorit sijaitsevat massanvalmistuksessa, jossa käytetään tahti- ja epätahtimoottoreita. Jakelumuuntajista valtaosa syöttää erilaisia pienjännite- moottorikeskuksia, joiden suuri moottorien määrä muodostaa ison osan kuormituksesta. Keskijänniteverkon rakenteella on oma merkityksensä käytön varmuuden kannalta. Eri jänniteportaat vaikeuttavat osaltaan varayhteyksien muodostamista jännitekatkojen aikana. Tämä korostaa osaltaan selektiivisen suojauksen tärkeyttä.

7.3.3 Pienjänniteverkot

Pienjännitepuolella pääasialliset jakelujännitteet ovat 400, 500 ja 690 V. 400 V verkko on pääasiallisesti valaistus- ja korjausvoimaverkko, vaikkakin sitä on enenevissä määrin liitetty prosessiin. 500 V ja 690 V verkkoja käytetään prosessissa pääosin moottorien ja linjakäyttöjen syöttämiseen. Jakelumuuntaja syöttää tavallisesti yhtä tai kahta pääkeskusta, jotka syöttävät kuormaa ja alakeskuksia. Muuntaja on tuotu keskijännitteellä lähelle pääkeskusta, jota syötetään usein lyhyellä kiskosillalla.

Pienjännitejakelua varmennetaan osittain varmennetuilla sähkönsyöttöjärjestel- millä (UPS) ja varavoimageneraattoreilla. UPS-laitteistoja on useita ympäri tehdasta, ja ne varmentavat tärkeimpiä tieto-, ohjaus- ja muistijärjestelmiä, osaa varavalaistuksesta ja muita kriittisiä kohteita. Varavoimageneraattoreita on neljä, ja niiden takana on UPS-laitteistoja ja varavalaistusta laajemmin sekä joitain tärkeitä laitteistoja, kuten hissejä. UPS-laitteistojen toiminta-aika on varsin lyhyt, joten ilman varavoimaa tulisi mahdollinen varayhteys kytkeä viipymättä, mikäli alkuperäistä syöttöä ei saada toimimaan. Varavoimageneraattorin syötönvaihtoa automaattikka kytkee verkkosyötön katketessa varavoimaverkon generaattorin perään automaattisesti.

7.3.4 Maadoitusjärjestelmä

110 kV päämuuntajien tähtipisteet ovat tehollisesti maadoitettuja. Keski-jänniteverkot ovat maasta erotettuja. 500 V ja 690 V verkot ovat joko maasta erotettuja tai niissä käytetään suuriresistanssista maadoitusta sekä väliaikaisesti vian hakutilanteessa kytkettävää pientä resistanssia. 400 V verkot ovat suoraan maadoitettuja. Tehtaan maadoitusverkon muodostavat tehdasta kiertävä maadoituselektrodi ja siihen yhdistetyt maadoituskiskot ja -rakenteet ympäri tehdasta. Kyseessä on siis laaja maadoitusjärjestelmä, jonka eheyttä valvotaan 12 vuoden välein tehtävin määräaikaismittauksin. Viimeisin mittaus on saatu päätökseen kesällä 2013, jossa todettiin järjestelmän olevan kunnossa. Mitatut maadoitusresistanssit VA-menetelmällä 110 kV kytkinkenttien ja paperitehtaiden välillä olivat: 0,039 Ω (2A-PK3) ja 0,048 Ω (3A-PK4) 100 A mittausvirralla. [Maadoitusmittauksen loppuraportti 2013]

7.4 Tehdasverkon vikavirtalaskenta

Tehtaan sähköverkon vikavirtalaskennan on vuodesta 2003 asti suorittanut ulkopuolinen toimittaja. Sen aikaisena laskentaohjelmana toimi Calpos, jonka korvasi Neplan 5.1 vuonna 2005. Kummatkin ohjelmat suorittavat laskennan IEC 60909- standardin mukaisesti. Laskentaa päivitetään tarpeen mukaan verkon muutosten yhteydessä yleensä muutaman vuoden välein. Viimeisin päivitys on kesältä 2013, jossa on huomioitu edelliseen laskentaan muutoksena PK3:n ja TMP1:n pysäyttäminen. Tehtaan vikavirtalaskelmat sisältävät oikosulkuvirrat 110 kV kytkinlaitoksissa, keski-jännitekojeistoissa ja pienjännitepääkeskuksissa ns. maksimi- ja minimi-tilanteiden aikana.

Maksimitilanteessa:

- tapahtuu syöttö kantaverkosta kahdella johdolla.
- ilmenee 110 kV kantaverkossa suurin oikosulkuvirta $I''_k = 18 \text{ kA}$, $Z'_k = (0,65 + j3,8) \Omega$ (R_k/X_k -suhde = 0,171).
- generaattorit ja moottorit ovat verkossa.
- tuloksena saadaan suurimmat mahdolliset oikosulkuvirrat 3-vaiheisessa oikosulussa.

Minimitilanteessa:

- tulee syöttö kantaverkosta yhdellä johdolla.
- ilmenee 110 kV verkossa pienin oikosulkuvirta $I'_k = 9,5 \text{ kA}$, $Z'_k = (1,09 + j7,3) \Omega$ (R_k/X_k -suhde = 0,149).
- generaattorit ja moottorit ovat irti verkosta.
- tuloksena saadaan pienimmät mahdolliset oikosulkuvirrat 2-vaiheisessa oikosulussa.
- oikosulkuvirta ei vaimene, koska tahti- ja epätahtikoneet ovat irti verkosta.

IEC-standardin mukaisesti vikapaikkaan on sijoitettu jännitelähde, jonka arvo on verkon käyttöjännite kerrottuna jännitekerroimella c . Maksimitilanteessa on käytetty standardin mukaista jännitekerrointa, mutta minimi-tilanteen kerrointa on laskettu arvoon 0,7 mah-

dollisen vikaimpedanssin huomioimiseksi. Kertoimet koko verkolle näkyvät taulukossa 7.1.

Taulukko 7.1 Jännitekerroimen c arvot eri jänniteportaisissa verkoissa.

| Jännite U_n (kV) | Maksimi tilanne | | Minimitilanne | |
|--------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|------------------|
| | Jännitekerroin c | | Jännitekerroin c | |
| | c_{laskenta} | c_{IEC} | c_{laskenta} | c_{IEC} |
| 6/10/20/110 | 1,1 | 1,1 | 0,7 | 1,0 |
| 0,5/0,69 | 1,1 | 1,1 | 0,7 | 1,0 |
| 0,4 | 1,1 | 1,1 | 0,7 | 0,95 |

Verkon komponenteista muodostetaan impedanssimatriisi, jonka avulla saadaan laskettua vikavirrat. Katkaisuvirran aikaviiveenä käytetään 50 ms ja ekvivalenttisen termisen oikosulkuvirran kestoajana 1 s. Laskennassa on huomioitu generaattorit ja keskijännitemoottorit yksitellen ja pienjännitemoottorit ekvivalenttien moottoriryhmien liityntätehoina pääsääntöisesti jakelumuuntajittain ja tarvittaessa tarkastettu keskuskohtaisesti. Moottoriryhmien käynnistysvirtoina on käytetty standardin mukaisesti viisinkertaisia arvoja nimellisvirtaan nähden. Suojareleasetteluja varten on erikseen huomioitava muuntaja- ja moottorikaapelien virtaa rajoittava vaikutus varsinkin pienimmän laukaisutavan virran tapauksessa.

Maasulkulaskelmat on tehty keskijänniteverkolla yksivaiheisessa maasulussa ilman vikavastusta ja vikavastuksen arvolla 500Ω . Vikakohdassa summavirralla pätee $3I_o = I''_k$. Laskennassa ei ole huomioitu moottorien maakapasitanssien virtaa kasvattavaa vaikutusta, joka on merkittävä varsinkin lyhyillä kaapelipituuksilla. 110 kV kanta-verkon syöttämä maasulkuvirta oli vuonna 2010 (käytetty vuoden 2013 laskennassa): $3I_o = 2,9$ kA maksimitilanteessa ja $3I_o = 2,7$ kA minimitilanteessa. Keskijänniteverkko on maasta erotettu. Maasulkuvirran muodostavat pääosin kaapelien ja johtojen maakapasitansseissa kulkevat varausvirrat, joiden summa poikkeaa nollasta maasulun aiheuttaman epäsymmetrian vuoksi. Maasulkuvirran suuruuteen vaikuttaa jonkin verran se, ovatko kuormittamattomat kaapelit jännitteisiä vai eivät, ja esimerkiksi varayhteyskaapelien tapauksessa se, että kummasta päästä kytkentä on tehty. [Verkostolaskelmat 2013]

7.5 Tehtaan keskijänniteverkon relesuojaus

Tehtaan keskijänniteverkon oikosulkusuojaus perustuu ylivirtareleiden käyttöön. Virran mittausta on toteutettu useimmiten kaikkien kolmen vaiheen osalta. Ylivirtareleissä käytetään yleensä kahta vakioaikaista porrasta, joista ylemmässä ($I >>$) ei käytetä hidastusta ja alemmassa ($I >$) suojauskohteen (moottori, muuntaja, ...) ja tarkoituksen (oikosulku- vai ylikuormitussuojaus) mukaan $0,15 \dots > 10$ s hidastuksia. Joissain numeerisissa releissä on mahdollisuus kolmannen portaan ($I >>>$) käyttöön sekä laajat virta- ja aika-asettelualueet. Mekaanisissa ja vanhimmissa staattisissa releissä ei ole mahdollista hidastaa $I >>$ -portaan toimintaa. Myös virran asettelualue on kapeampi etenkin mekaani-

sisä releissä. Useimmissa numeerisissa releissä I>-portaan voisi asettaa käänteisaika-toimintaiseksi. Tehtaan uusimmissa releasennuksissa käytetään I>>/I>>>-portaiden lukituksia lähdön releen ja syötön tai syöttöjen releiden välillä. Ylivirtareleiden lisäksi relemodernisointien yhteydessä ollaan kojeistoihin ja kuristintiloihin asennettu valokaarisuojausjärjestelmiä nopeaksi oikosulkusuojaksi. Päämuuntajien ja joidenkin tahtikoneiden suojaukseen käytetään ylivirtareleiden lisäksi differentiaalireleitä.

Ylivirtareleiden lisäksi käytetään ylivirtaan perustuvia ylikuormitussuojia etenkin moottori- ja muuntajalähdöillä. Uusissa releissä terminen ylikuormitussuoja sisältyy samaan ylivirtareleeseen, kuten myös staattisissa moottorin suojarелеissä. Erillistä mekaanista toisiolämpörelettä käytetään mekaanisten ylivirtareleiden yhteydessä. Ylivirtareleitä käytetään aina laukaisevina samoin kuin ylikuormitussuojiaakin yleensä.

Maasulkusuojaukseen käytetään hälyttäviä nollajännitereleitä kojeistokiskoissa jännitemuuntajien avokolmiokytkennöin. Lisäksi osassa verkkoa maasulku laukaistaan tai tunnistetaan lähtökohtaisilla maasulun ylivirta- tai suuntareleillä, jotka mittaavat nollavirtaa kaapelivirtamuuntajalla tai virtamuuntajien summakytkennällä. Hälytyksiä valvotaan jatkuvasti miehitetyssä keskusvalvomossa, josta vika saatetaan käyttöhenkilökunnan tietoon välittömästi. Vikapaikkaa aletaan paikantaa, ja vian riskit kartoitetaan. Jos lähtökohtaista vikaindikointia ei ole vikaantuneessa verkon osassa, prosessin kannalta toissijaisia lähtöjä irtikytkeillä rajataan vian sijaintia. Näin voidaan laukaista vika, mutta jos vika paikantuu lähdölle, jonka irtikytkeä ei ole prosessin kannalta suotavaa, selvitetään vian aiheuttama vaara, ja jatketaan käyttöä turvallisuuden täytyessä, kunnes prosessi sallii katkon.

Tehtaan keskijänniteverkon suojarелеistä yli 40 % on numeerisia, yli 40 % staattisia ja loput yli 10 % mekaanisia. Vanhimpia mekaanisia releitä korvataan relemodernisointiprojekteissa uusilla numeerisilla kennoterminaaleilla toistuvasti 1...5 vuoden välein. Sen lisäksi, että ikääntyneet mekaaniset releet aiheuttavat epävarmuuden eliniän säilymisen suhteen, ilmenee relekoestuksissa toimintavikoja juuri mekaanisissa releissä. Lisäksi joissain staattisissa releissä ja ensimmäisen polven mikroprosessorireleissä on ilmennyt vikoja. Sen sijaan uusien kennoterminaalien toiminta on ollut luotettavaa. [Relekoestuspöytäkirjat ja relekortit 2013, Sähkön jakelukaaviot]

7.6 Keskijännitekojeistot

Tehtaan vanhimmat kojeistot ovat 1960-luvulta ja uusimmat 2000-luvulta. Viimeiset avonaiset häkkikojeistot on korvattu uudemmillä paremmin koteloiduilla. Tehtaalla on kuitenkin vielä käytössä 1960-luvun lopun Strömbergin MEKU- ja MEKA- kojeistoja. Näiden kojeistojen katkaisijat ovat suurimmaksi osaksi vähäöljykatkaisijoita. Niiden silloisen katkaisukyvyyn riittämättömyyden vuoksi on myös paineilma- ja kaasukatkaisijoita joiden huollettavuus vaikeutuu koko ajan varaosien saatavuuden heikentyessä. MEKU- ja MEKA- kojeistot ovat avonaisia päältä sähkötilaan ja alta kaapelitilaan. Tämän vuoksi voimakkaat valokaarivaikutukset, katkaisijoiden öljy ja kaapelipalot aiheuttavat oman vaaransa sähkötilassa onnettomuuden sattuessa oleville. Myös omaisuusvahingot ja

keskeytyskustannukset kasvavat vahingon levitessä nopeasti. MEKU- kojeistojen uusiminen tulisi kalliiksi suuren kennoleveyden vuoksi, koska kuristimien ja pää- sekä käynnistysmuuntajien kiskostot vaatisivat uusimista, korvaamista kaapeleilla tai erikoistoimenpiteitä. Vuoden 1980 META- kojeistot ja tätä uudemmat kojeistot ovat vähintäänkin pohjalevyillä suojattuja ja vaunukatkaisijoilla varustettu. Pohjalevy estää tai ainakin hidastaa kaapelipalon leviämistä kaapelitilasta kojeiston sisään ja muuhun sähkötilaan. Vaunukatkaisija helpottaa ja nopeuttaa katkaisijahuoltoa sekä parantaa myös sähkötyöturvallisuutta, kun katkaisijan voi erottaa ja irrottaa kiskostosta kennoon sisälle menemättä. Uusimpien kojeistojen katot ovat suljettuja ja kennojen eri osat on laipioin erotettu, mikä estää tehokkaasti vaurioiden rajautumisen mahdollisimman tehokkaasti. [Vanhat Strömbergin kojeistot Raumalla]

Viimeisimmät keskijännitekojeistojen uusinnat tapahtuivat syksyllä 2013. Tällöin uusittiin RaumaCell:n 29D- ja 30D-kojeistot. Kojestot olivat tehtaan vanhimpia niiden käyttöönottovuoden ollessa 1960. Kojestoille ei ollut ilmoitettu oikosulkulujuusarvoja, ja ne olivat rakenteeltaan avoimia häkkikojestoja. Rakenteensa puolesta niitä ei voinut pitää turvallisena varsinkaan sähkötöiden ja mahdollisten valokaarivikojen kannalta. Korvaavat kojeistot ovat 1980-luvun lopun Siemensin kojeistoja, jotka eivät kuitenkaan ole oleellisesti vanhentuneita. Vaunukatkaisijat tulivat kojeiston mukana, mutta virtamuuntajia jouduttiin vaihtamaan lähtökuormille sopiviksi. Virtamuuntajat löytyivät tehtaan varastosta. Suojareleet päätettiin uusia. Releiksi valikoituivat VAMP 255-kennoterminalit ja VAMP 221-keskittimeen perustuva valokaarisuojaus, joita tehtaalla on käytetty aiemmissakin relemodernisointiprojekteissa.

Vanhan 29D-kojeiston varasyöttö oli toteutettu hankalasti käytettäväksi. Pääsyöttö sekä varasyöttö tulivat samaan kenttään, jossa syöttöä ohjattiin erottimella. Syötön kääntö aiheutti sähkökatkon ja vaati kytkentöjä kolmessa eri kohteessa. Uudistuksessa kytkettiin vara- ja pääsyötöt omiin katkaisijoilla varustettuihin kennoihin, jolloin on mahdollista katkoton syötönvaihto esimerkiksi huoltotöiden takia. Myös pääsyötön vikaantuessa on varasyötön kytkentä nopeammin ja vaivattomammin suoritettavissa.

Kojeistousintaan ajoi ensi sijassa turvallisuustekijät ja elinkaaren loppuminen. Turvallisuuden kannalta merkittävin tekijä on kojeistojen oikosulkulujuuden kasvu ja oikosulun vaikutusten osastoiminen. Samassa parani laitteiston käytettävyyttä ja huollettavuus etenkin katkaisijoiden osalta. Myös käyttövarmuus, jolla on ensisijainen vaikutus tuotantoon, parani etenkin syöttökenttäuudistusten sekä relemodernisoinnin ansiosta. [Bergman 2014, Ahonen 2014, Sähkökaaviot]

7.7 Aiemmat selektiivisyystarkastelut

Ylivirtasuojauksen selektiivisyystarkasteluita on koko tehtaan laajuisesti tehty viimeksi 80-luvulla, mistä verkko on paikoitellen uudistunut ja muuttunut. Yksittäisiä releasetteluita ja selektiivisyystarkasteluja on suoritettu käyttöhenkilökunnan toimesta lähinnä tarpeen mukaan eli vikojen ilmaantuessa. Releasettelujen muutoksista ei välttämättä tehdä dokumentointia. Relemodernisointien yhteydessä ei myöskään olla tehty juuri-

kaan selektiivisyystarkasteluja. Uusien kojeistojen käyttöönotoissa sen sijaan on tarkasteltu myös selektiivisyyttä.

Viimeisin tarkastelu toteutettiin RaumaCellin kojeistoja ja suojaareleitä uusittaessa ulkopuolisella suunnittelutoimistolla. Vanhojen kojeistojen suojauksessa oli ilmennyt aiemmin sattuneiden vikojen yhteydessä selektiivisyysongelmia. Vanhat releet olivat pääasiassa sähkömekaanisia releitä ja iän puolesta niiden luotettavuus oli kyseenalainen käytössä olleella kolmen vuoden koestusaikavälillä. Ylivirtasuojauksesta vastasi lähtö- ja syöttökohtaiset ylivirtareleet ja toisiolämpöreleet. Maasulkusuojaus oli tehtaalla yleinen kiskostoon kytketty hälyttävä nollajänniterele. Vaikka näissä releissä ei ole paljon suojaominaisuuksia, oli joistain asettelusta silti karsittu. Kolmen muuntajälähdön kohdalla ei ollut käytössä hetkellistä virtalaukaisua, jolloin oikosulun laukaisu olisi jäänyt hidastetun (0,5 s) portaan laukaistavaksi.

Uudet kennoterminaalit sisältävät aiemman kahden ylivirtaportaan sijaan kolme ylivirtaporrasta, jotka otettiin käyttöön jakelumuuntajälähdöissä toiminta-ajoilla 0,04 s, 0,15 s ja 0,3 s. Kojestojen syöttöjen ja lähtöjen välillä toteutettiin lukitussuojaus 0,1 s viiveellä lukittavilla suojilla. Hälyttävät nollajännitereletoivat varasuojana laukaistavalle lähtösuojaukselle. Jokainen lähtö varustettiin kaapelivirtamuuntajilla maasulkuvirran mittaamiseksi. Kojestojen väliset yhteydet on suojattu maasulun suuntareleillä ja moottori- ja muuntajälähdöt maasulun ylivirtareleillä. Maasulkureleiden välillä on 0,2 s aikaporrastus, niin että lähtöreleiden aikahidastus on 0,2 s ja kiskon nollajänniterele toimii viimeisimpänä 1 s asettelulla. [Relekoestuspöytäkirjat ja relekortit 2013; Bergman 2014]

7.8 Tehtaalla ilmenneitä vikatilanteita

Tehtaalla laaditaan laajoista sähkönjakelun häiriöistä paikoin perusteellisiakin häiriöraportteja, mutta pienemmistä vioista tai epäselektiivisistä suojaustoiminnoista dokumentointi voi jäädä tekemättä. Seuraavassa on muutamia esimerkkitapauksia vikatilanteista viime vuosilta.

Vuoden 2013 alussa sattunut vesiputkirikko aiheutti kaksivaiheisen oikosulun 6D18-lähdöllä jälkijauhimen 6 kV oikosulkumoottorissa. Lähdön releen lisäksi vikaan havahtui myös 6D-kojeistoa syöttävän lähdön 5D13 rele, joka laukaisi vian pois. Syötön releen tallentama vikavirta oli noin 10 kA, joka ylittää pikalaukaisun virta-asettelun 9000 A. Releille ei ollut aseteltu hidastuksia. Tilanteesta aiheutui sähkökatko 6D:n II-kiskostoon ja 8D-kojeistoon. Kyseessä on epäselektiivinen laukaisu, josta olisi selvitty pelkän moottorilähdön laukaisulla, mikäli suojaus olisi ollut selektiivinen. [Vikakirjaus 2013; Ahonen 2014]

Vuonna 2006 sattui vakavampi oikosulkuvika, jossa suojauksen toiminta oli liian hidasta, koska pikalaukaisu ei kattanut suojauskohdettaan, jolloin vian kesto-aika kasvoi suureksi. 4D-kojeiston poistamisen takia päämuuntajan M4 syöttökaapelit käännettiin kojeistoon 23D, minkä takia 15 kaapeliin tehtiin jatkot. Kolmessa kaapelissa sattui asennusvirhe, mikä aiheutti kolmivaiheisen oikosulun, joka levisi myös osaan

muista kaapeleista. 110 kV ylivirtareleen 2 s hidastettu laukaisu laukaisi vian. Ylivirtareleen lisäksi tehtaalla on päämuuntajan ja sitä syöttävän kaapelin nopeana oikosulkusuojana käytössä normaalisti differentiaalirele. Ylivirtareleen pikalaukaisu suojaa päämuuntajan ensiöpuolta, ja tarjoaa hidastetun varasuojan toisiopuolella. M4:n kohdalla differentiaalirele poistettiin käytöstä uuden kohteen kohdalla eikä ylivirtareleen pikalaukaisun asettelua ollut korjattu uuden tilanteen vaatimaksi. 6 kV verkon lisäksi jäi sähköttä kolmikäämimuuntajan 20 kV verkko, joka syöttää muun muassa jätevesilaitosta. Varayhteys jätevesilaitokselle saatiin saman yön aikana käyttöön. Myös 6 kV verkkoon kytkettiin sähkö korvaavaa reittiä. Kaapelivauriot kaapelitilassa olivat suuret. Kaapelipalo sotki kaapelitilan noella ja kupariroiskeilla. Nokea kulkeutui myös ylempänä olevaan kojeistoon ja rakennuksen ylimpiin kerroksiin asti, mistä aiheutui puhdistustöitä myöhemmin. Kuvassa 7.1 näkyy kaapelivaurioita sekä kaapelitilan sotkuja vaurio paikalta korjaustöiden yhteydessä.



Kuva 7.1 Kaapelitilassa sattuneen kolmivaiheisen oikosulun aiheuttamia kaapelivaurioita.

Alkuperäisen oikosulkuvian epäillään aiheuttaneen ferresonanssi-ilmiön päämuuntajan 6 kV verkossa. Parin päivän päästä 1D:n syöttö 23D:stä laukesi maasulkuun laukaisevan maasulkusuojauksen toimiessa. Maasulun takia RaumaCell, polttoainekenttä sekä prosessivesivarasto olivat tunnin sähköttä, kunnes saatiin varayhteys käyttöön 3D:stä. Samanaikaisesti 23D:n syöttämässä TMP1:n apukojelaitoksessa sattui yhden vaiheen jännitemuuntajavaurio. Seuraavana päivänä sattui maasulku TMP1:n eri lähdöllä maasulku, joka paikantui myös apukojelaitoksen jännitemuuntajavikaan. Vikaantuneet jännitemuuntajat olivat kummatkin L1-vaiheessa. [Häiriöraportti 2006]

Vuoden 2013 lopussa sattui PK2:n alueella 500 V moottorikeskuksessa oikosulku, jonka valokaarirele tunnisti laukaisten keskuksen pääkatkaisijan. Nopean poiskytkennän ansiosta vauriot rajoittui vikaantuneeseen kenttään. Vika sattui lähtökennon varokealustan liitännässä, jossa näkyi palojälkiä reunimmaisissa johtimissa. Tämä viittaisi kenties rungon kautta kiertäneeseen kaksivaiheiseen valokaarioikosulkuun. Juurisyyksi paljastui johdinliitoksesta puuttunut paineentasauslaatta, minkä vuoksi liitos oli löystynyt.

Vuoden 2014 alussa PK1:n 4. infrakeskuksen yhden lähtökentän varokealustassa sattui oikosulku. Keskuksessa ei ole pääkatkaisijaa, vaan vian laukaisi 6 kV lähdön kat-

kaisija lähdön ylivirtareleen käskystä. Tilanteesta selvittiin melko vähäisin vaurioin. Vanhan keskuksen alhaalta ylös asti avoin kenttärakenne tosin ei rajaa vian jälkiä tehokkaasti. Muun muassa kentässä sijainneita ohjauskortteja vaihdettiin. Onneksi samassa sähkötilassa oli käytöstä poistuneita vastaavanlaisia keskuksia, joista saatiin varaosia. Vian aiheutti luultavasti varokealustan huono liitos. Keskukset lämpökuvataan 6 kk välein eikä edellisessä kuvauksessa liitoksessa ollut tiettävästi näkynyt mitään hälyttävää. [Automaatiokunnossapidon henkilöstö 2014]

Vuoden 2013 alussa aiheutui maasulkuhälytys 1D-kojeistossa. Päämuuntajan takainen verkko sisälsi useita kojeistoja, joten vian sijainnista ei ollut tarkkaa tietoa. Vaarana oli, että vika paikallistuisi voimalaitokselle, joka voisi pahimmillaan tarkoittaa voimalaitoksen alasajoa. Verkkoon kuuluu myös RaumaCell:n 29D- ja 30D-kojeistot, joista vianhaku aloitettiin, sillä RaumaCell seisahtuu viikonlopuksi. Tällöin vika poistui lähdön 29D02 irrottamisella, joten vika saatiin paikannettua kyseisen lähdön muuntajan syöttökaapeliin. Tilanteesta selvittiin ilman suunnittelelmattomia tuotannon keskeytyksiä pelkällä kaapelin uusinnalla. [Ahonen 2014]

Edellä mainittujen vikatilanteiden perusteella voidaan tehdä joitain johtopäätöksiä esiintyvistä vioista ja suojauksen toiminnan merkityksestä. Ensin mainitun vian epäselektiivinen laukaisu sattui seisokkitilanteessa, mutta normaalin käytön aikana keskeytyskustannukset olisivat nousseet. Toiseksi mainitussa viassa esiintynyt pitkäkestoinen oikosulku voi aiheuttaa ensisijassa ilmenevien kaapelivaurioiden lisäksi suoria sekä jännitepiikeistä aiheutuvia vaurioita laajemmalla galvaanisen verkon alueella. Kojeistojen ja keskusten vioissa uudet kotelorakenteet ja nopea valokaarisuojaus hillitsevät tehokkaasti laajempien vaurioiden syntyä. Ilman lähtökohtaista maasulkusuojausta, olipa suojaus laukaiseva tai hälyttävä, päämuuntajan syöttäessä laajaa verkkoa ja useita kojeistoja, voi maasulkuvian etsintä muodostua hankalaksi. Vikavirran ollessa maasulussa pieni, ei virran aiheuttamia tuhoja synny, mutta maasulussa ilmenevät jänniterasitukset voivat rikkoa laitteita ja aikaansaada kaksoismaasulun.

8 CASE-TARKASTELU

Tehdasverkon laajuuden takia valitaan tarkempaan tarkasteluun toiminnallisesti selkeä rajattavissa oleva verkon osa. Tämän verkon osan suojausta ja selektiivisyyttä tarkastellaan oiko- ja maasulkusuojauksen osalta. Kuormalaitekohtaisia tarkempia suojaustoimintoja esimerkiksi moottorien kohdalla ei tarkastella. Kytchentätilanteista tarkastellaan etusijassa vain normaalia kytkentätilaa, mutta kytkentämuutosten vaikutus pyritään tuomaan esiin.

Tarkastelussa keskitytään keskijänniteverkkoon. Syötön puolelta rajaudutaan päämuuntajan toision puolelle ja kuorman puolen rajan muodostaa jakelumuuntajan toision pääasiallinen syöttökohde, joka on usein pienjännitepääkeskus. Tarkasteltava syöttöketju ulottuu käytännössä päämuuntajan jälkeiseltä pääkojeiston syöttökatkaisijalta PJ-keskuksen pääkatkaisijalle. PJ-keskuksen pääkatkaisijan ja lähtösulakkeiden välillä selektiivisyyttä ei tarkastella. Tarkastelun ulkopuolelle jää myös 110 kV lähtöreleiden toiminta. Tarkastelut keskittyvät releiden toiminnan ja ulottuvuuksien tarkasteluun käytettävien releiden ja niiden asettelujen osalta. Mittamuuntajien osalta huomioidaan lähinnä muuntosuhde ja mittamuuntajatyypin soveltuvuus kohteeseen.

8.1 Tutkittava verkon osa

Työssä tarkastellaan PK1:n ja hiomon 6 kV jakeluverkkoa normaalissa kytkentätilassa. Verkkoa syöttää kaksi 110 kV päämuuntajaa, M6 (hiomo) ja M7 (PK1), jotka saavat syöttönsä 3A-kytkinkentältä. M6 on nimellisteholtaan 30 MVA ja M7 45 MVA, ja muuntajat ovat kytkentäryhmältään YNd11. Päämuuntajien takainen 6 kV verkko sisältää neljä kojeistoa (5D, 6D, 7D ja 8D), neljä kuristinta, neljä tahtimoottoria, 15 oikosulkumoottoria, 36 jakelumuuntajaa, kojeistojen välisiä yhteyksiä ja varayhteyksiä muihin tehtaan kojeistoihin. Liitteessä 2 on kojeistojen välinen jakelukaavio. Päämuuntajat syöttävät 5D-pääkojeistoa, jonka kuormana ovat hiomon tahtimoottorit, alakojeistosyötöt kuristimien kautta, rejektijauhimen oikosulkumoottori ja jakelumuuntaja M90. M90 syöttää 690 V kompressorikeskusta 90G. Lisäksi kuorimon 26D-kojeistoa syötetään 5D-kojeistosta. Varayhteys voidaan järjestää lähinnä alakojeistosta 6D kuristimien kautta toisen päämuuntajan korvaamiseksi, jolloin kuormituksia täytyy järjestellä tehonjaon mukaan.

Yläkerroksessa sijaitseva 5D-pääkojeisto syöttää alimman kerroksen alakojeistoa 6D välikerroksen kuristimien (4 x 15 MVA) ja lyhyiden koteloitujen kiskostojen kautta. Alakojeistoja 7D ja 8D syötetään 6D:stä. Niiden lisäksi 6D:stä syötetään katkaisulaitoksen 24D-kojeistoa ja vesilaitoksen 20D-kojeistoa. RaumaCellin 29D-kojeistolle on varasyöttö. Varayhteyksiä 10D- ja 11D-kojeistoihin voidaan käyttää molempiin

suuntiin tehoa syötettäessä. 6 kV oikosulkumoottorilähtöjä on kaksi: massanvalmistuksen jälkijauhin ja sellujauhin. Kojeistosta syötetään useita paperiprosessin alkupäähän liittyviä pääasiassa 500 V moottorikeskuksia jakelumuuntajien välityksellä. Hiomon ja PK1:n märän pään hallivalaistusta syötetään M7-jakelumuuntajan li-valaistuspääkeskuksen kautta. Lisäksi PK1:n infrakuivainkeskuksia syötetään 6D-kojeistosta.

7D-kojeisto on selvästi erillään muista kojeistoista syöttökaapelien ollessa noin 300 m 6D-kojeistosta sijoittuen paperilinjan keskivaiheille. 7D-kojeisto syöttää pääasiassa PK1:n prosessia. Kuorma muodostuu useista NASH-pumppujen oikosulkumootto-reista, 500 V moottorikeskuksista sekä linjakäyttökeskuksista. PK1:n kuivan pään halli-valaistusta syötetään M15-jakelumuuntajan 2i-valaistuspääkeskuksen kautta. 8D sijaitsee samassa sähkötilassa 6D-kojeiston kanssa ja on ns. jauhinkojeisto, joka syöttää nykyään vain kahden jauhimen oikosulkumootto-reita sekä yhtä 500 V moottorikeskusta. Kojeistot ovat 8D-kojeistoa lukuun ottamatta kaksikiskostoisia, joista 5D- ja 6D-kojeistojen kiskostot on lisäksi erotettu pitkittäiserottimin yhteensä neljään erillään käytettävissä olevaan kiskostoon. Kaksoiskiskosto- eli KK-järjestelmät voidaan liittää yhteen kiskokatkaisijalla, joka on normaalisti auki. Jakelumuuntajien nimellistehot ovat välillä 700...4000 kVA.

Prosessista voidaan lyhyesti todeta, että se on ajan saatossa hajautunut eri puolelle verkkoa. Paperilinja ei pyöri pelkästään 7D-kojeistosta ja massan valmistus on hajautettu kolmen kojeiston alueelle. Jo yksittäisenkin lähdön sähkökatko voi ajaa joko paperiprosessin tai massan valmistuksen alas. Hiomon seisahtuminen sallii paperin tuotannolle muutaman tunnin käytön säiliökapasiteetilla. Lähdön sijaan koko kojeiston sähkökatko aiheuttaa todennäköisemmin prosessin hallitsemattoman alasajon ja prosessin uudelleenkäynnistys vaikeutuu. Tällöin voi olla kannattavampaa aloittaa suunnittelemanon seisokki.

8.2 Verkon osan suojaus yleisesti

110 kV lähtöjen ja päämuuntajien ensisijaisena suojana toimivat differentiaalireleet. Niiden piiriin kuuluvat myös 6 kV pääkojeistojen syöttökaapelit päämuuntajilta. Lisäksi lähdöissä ovat ylivirtareleet, joiden ensisijainen suoja-alue ulottuu päämuuntajien ensiöpuolelle ja hitaampi varasuoja toision puolelle. Päämuuntajien lisäksi tahtimootto-reista hiomakoneet 1, 2 ja 3 ovat suojattu differentiaalireleillä. Differentiaalireleet muodostavat suojausalueillaan herkän ja nopean absoluuttisesti selektiivisen suojauksen. Paikallisena suojana toimivat myös 5D- ja 6D-kojeistojen sekä niiden välisten kuristinbunkkerien valokaarisuojaukset, jotka toimivat nopeana oikosulkusuojana. Valokaarisuojien toimintaehtoina ovat sekä riittävä valoilmio että riittävä muutosvirta. Valokaarisuojaus otettiin 5D- ja 6D-relemodernisoinnin yhteydessä käyttöön, jossa vanhat sähkömekaaniset ja staattiset releet korvattiin uusilla numeerisilla releillä. Samanlaista VAMP 255-kennoterminaalia käytetään moottori-, muuntaja-, kojeistoyhteys- ja mittauskentissä, ja se sisältää niin laajat ylivirta- kuin maasulkusuojaustoiminnot. Moottori-

lähdöissä suojalle asetetaan moottorinsuojaustoiminta (M), joka mahdollistaa yhä laajemmat moottorin suojatoiminnot.

8D-kojeistossa on käytössä ensimmäisen polven mikroprosessorireleitä sekä staattisia releitä. 7D-kojeisto edustaa vanhinta tekniikkaa releiden ollessa pääasiassa staattisia ja mekaanisia. Näistä mekaanisia releitä käytetään lähinnä jakelumuuntajien ylivirta- ja kuormitussuojina. Ylikuormitussuoja on tyypiltään toisiolämpörele ja ylivirtasuojat vaihekohtaisia vakioaikahidastus- ja hetkellistoimintaisia ylivirtareleitä. Sen sijaan keskijännitemoottorit on suojattu elektronisilla moottorin suojarieleillä.

Moottorien suojarелеet sisältävät usein ylivirta- ja -kuormitussuojan lisäksi vinokuormitussuojan ja käynnistyksen jumisuojan. Moottoreissa käytetään yleensä myös käämityksen lämpötilaa mittaavia termistoreita ylikuormitussuojana. Muuntajan sisäisiä suojia ovat lämpötila- ja kaasureleet. Lähes kaikissa muuntajalähdöissä toisiopuolella käytetään katkaisijaa PJ-pääkeskuksen oikosulku- ja ylikuormitussuojana. Ainoastaan kuudella lähdöllä 6 kV katkaisija toimii keskuksen oiko- ja ylikuormitussuojana. Kahdessa näistä lähdöistä käytetään lähdon ylivirtareleen lisäksi PJ-keskuksen syöttökiskoston yhteyteen sijoitettuja virtamuuntajia ja ABB SPAJ 141C-ylivirtareleitä toisiovirran mittaukseen. Kiskosillan ylivirtareleitä käytetään lisänä kahdella PJ-pääkatkaisijalla suojatussa lähdössä. Releillä ohjataan 6 kV lähdon katkaisijaa.

Jokaista 6 kV kojeiston kiskostoa mitataan alijännite- ja nollajännitereleillä. Alijännitereleen tarkoitus on suojata etenkin moottorien ylikuormittumista liian alhaisella jännitteellä käydessä. Nollajännitereleet toimivat hälyttävänä maasulkusuojana. Osittain käytetään maasulun lähtökohtaisia suojia, jotka laukaisevat tai hälyttävät. VAMP 255-kennoterminalissa on mahdollisuus maasulkuvirran suunnattuun tai suuntamattomaan suojaukseen. ABB:n SPAJ 141C- ja SPAJ 150C-suojarieleissä on maasulun suuntaamaton virtasuojia. Erillisiä elektronisia maasulun virta- tai suuntareleitä on muutamia. Maasulkuvirran mittaukseen käytetään pääasiassa kaapelivirtamuuntajia virtamuuntajien summakytkennän sijaan. Liitteeseen 3 on koottu tarkasteltavan keskijänniteverkon suojarелеet ja niiden käytössä olevat suojaustoiminnot.

8.3 Ylivirtasuojauksen tarkastelu

Ylivirtasuojauksen tarkastelussa on kerätty tarvittavia verkon ja suojauksen tietoja Excel-taulukoon. Koottuja tietoja ovat verkon nimelliskuormat, kuormien kytkentävir-tasysäykset, suojalaitteiden nimellis-, asettelu- ja toiminta-arvot, kojeistojen ja keskuk-sien oikosulkuvirrat sekä kaapelit ja niiden termiset kestoisuudet. Kaikki tarkasteluissa käytetyt virta-arvot on ilmoitettu 6 kV tasossa.

Ylivirtareleen asetteluvirta muodostuu asettelukertoimen ja virtamuuntajan ensiövirran tulona. Ylivirtareleen hidastettua porrasta merkitään symbolilla $I>$ ja hetkellis-porrasta $I>>$. Myös $I>>$ -portaaseen voidaan useimmilla releillä asettaa viive. VAMP 255-releillä on käytettävissä kolme vakioaikahidasteista porrasta, jolloin $I>>>$ on nopein porras, ja $I>$ voisi olla käänteisaikainen. Releissä käytetään vakioaikatoimintaisia portaita poikkeuksena PJ-pääkatkaisijan ylikuormitusporras. Kaikissa PJ-katkaisijoissa

on L-ylikuormitusporras (L=Long time) ja hetkellinen I-oikosulkuporras (I=instantaneous). Useimmissa PJ-katkaisijoissa on lisäksi näiden välissä hidastettu S-oikosulkuporras (S=Short time), johon voidaan asettaa lyhyt viive. L-porras on jokaisessa tarkastelun PJ-katkaisijassa käänteisaikatoimintainen.

Moottorien käynnistysvirtoina käytetään vikavirtalaskennan lähtötietoihin ilmoitettuja arvoja, ja muuntajien kytkentävirrät arvioidaan taulukon 6.1 mukaisesti muuntajan nimellistehon mukaan. Suurimpana oikosulkuvirtana käytetään vikavirtalaskennan maksimitilanteen mukaista kolmivaiheisen oikosulun katkaisuvirtaa 50 ms katkaisuviiveellä. Pienimpänä oikosulkuvirtana käytetään kaksivaiheista oikosulkuvirtaa minimitalanteessa, jossa oikosulkuvirta ei vaimene.

Suoraan maadoitetuissa PJ-verkoissa voi yksivaiheisen oikosulun virta näkyä KJ-verkon puolella pienimpänä oikosulkuvirtana. Tämä huomioidaan Dyn-kytkentäisten muuntajien syöttämissä suoraan maadoitetuissa 400 V verkoissa kertomalla PJ-keskuksen minimioikosulkuvirta kertoimella $1/\sqrt{3}$. Minimioikosulkuvirtana käytetään tässäkin kohtaa pienintä kaksivaiheista oikosulkuvirtaa, joka tuottaa keskuksen oikosulkutilanteista pienimmän oikosulkuvirran. Yksivaiheinen oikosulkuvirta muodostuu vasta kauempana verkossa tapahtuvassa viassa pienemmäksi. Kaksivaiheisesta oikosulkuvirrasta redusoitu arvo ensiön puolelle on siis todellista yksivaiheisen oikosulkuvirran redusoitua arvoa hieman pienempi, jolloin sitä voidaan käyttää tässä kohtaa, kun halutaan varmistaa laukaisu pienimmällä mahdollisella oikosulkuvirralla.

Kaapelien yhden sekunnin termisen oikosulkuvirran kestoisuudet ovat taulukon 8.1 mukaisia.

Taulukko 8.1 Kaapeleiden termiset kestoisuudet yhden sekunnin oikosulkuvirroilla. [Teollisuuden sähköverkot 2 1985, Reka Kaapeli Oy 2014, Prysmian Group Suomi 2014]

| Eriste | Tyyppi | A [mm ²] | 70 | 120 | 185 | 240 | 300 | 500 | 800 |
|--------|-----------|----------------------|-----|------|------|------|------|-----|-----|
| PEX | AHXCMM(M) | I _{1s} [kA] | 6,7 | 11,4 | 17,5 | 22,6 | 28,2 | 47 | 75 |
| | AHXAMK-W | | | | | | | | |
| Paperi | APYAKMM | I _{1s} [kA] | 7,3 | 12,3 | 19,2 | 24,8 | 31 | - | - |

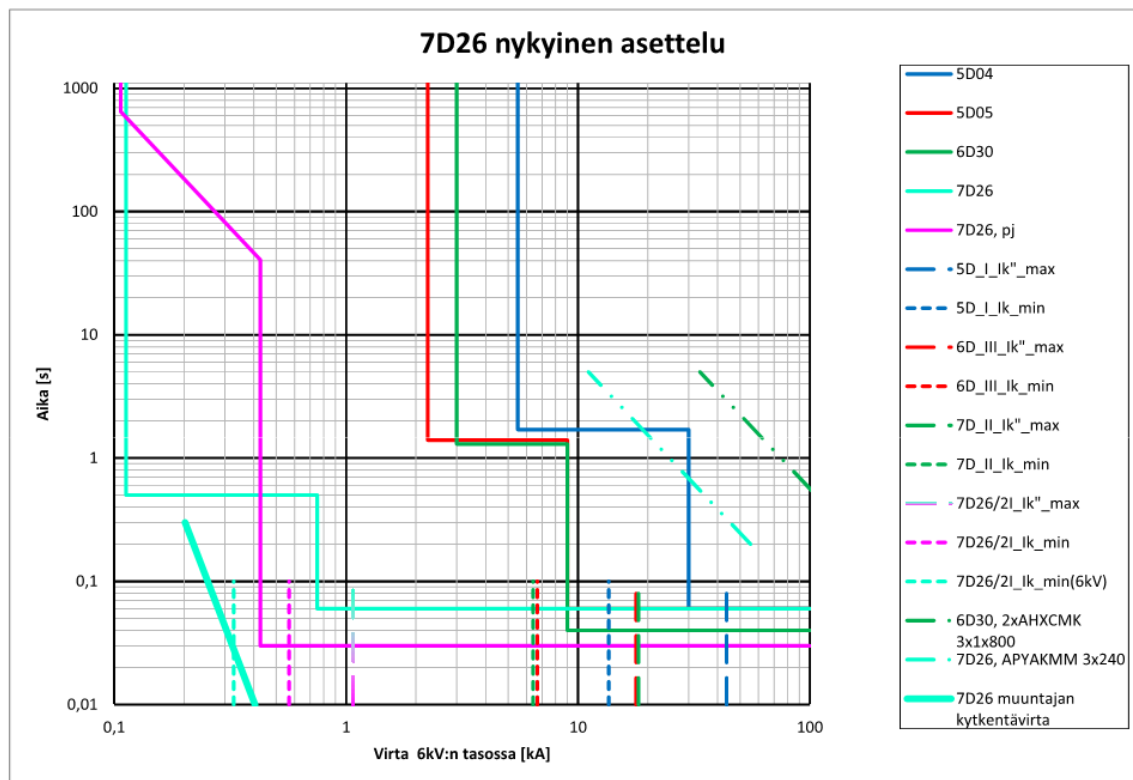
Taulukon termiset kestoisuudet on määritetty niin, että oikosulkua edeltävä suurin sallittu käyttölämpötila on sähköturvallisuusmääräysten mukaisesti 65 °C paperieristeisille ja 90 °C ilmaan asennetuille PEX-eristeisille kaapeleille. Kaapeleiden lämpötila ei saa nousta 250 °C korkeammaksi oikosulussa. Yhden sekunnin arvoista on yhtälön (32) avulla laskettu termiset kestoisuudet aikavälille 0,2...5 s.

8.3.1 Selektiivisyyskäyrästä

Releiden toimintakäyrät ja suojauksessa huomioitavat oikosulkuvirrät on esitetty selektiivisyyskäyrästä, kuten myös tilanteesta riippuen huomioitavat muuntajien kytkentävirrät ja kaapeleiden termisiä kestoisuuksia kuvaavat virtakäyrät. KJ-ylivirtareleet ja PJ-katkaisijoiden releet mallinnetaan releasettelujen ja virtamuuntajien muuntosuhteen perusteella toimintakäyrinä niin, että katkaisijan toiminta-aika on erikseen huomioitava

suojiin välisessä aikaporrastuksessa sekä oikosulun kokonaislaukaisuaajoissa. KJ-katkaisijoiden kokonaistoiminta-ajat ovat verkon katkaisijoilla 50...100 ms välillä, kun PJ-katkaisijat voivat toimia alle 50 ms. Tarkan yksittäisen porrasajan määrittämisen sijaan tyydytään käyttämään aikaporrastuksena luvussa 6.1.3 mainittuja porrassaikoja; numeeriset 0,15 s, staattiset 0,3 s ja mekaaniset 0,5 s. Tarkasteltavien releiden ollessa erityyppisiä käytetään yllä mainittujen arvojen välisiä keskiarvoja. Katkaisijan toiminta-ajaksi kaapelin termisen kestoisuuden tarkastelemiseksi voidaan olettaa 100 ms. Muuntajan kytkentävirtasysäyksen piirtoon käytetään taulukon 6.1 suurinta ensiöpuolelle kytkettäessä ilmenevän virran huippuarvoa $6 \times I_n$ ajan hetkellä 0,01 s. Puoliintumisaikana käytetään 0,3 s. Arvot on valittu keskimääräisesti taulukon yhden ja viiden MVA muuntajien väliltä.

Kuvassa 8.1 on esimerkki tarkastelussa käytettävästä selektiivisyyskäyrästä ja siinä käytettävistä termeistä. Suojalaitteiden toimintakäyrät luetellaan syöttävästä verkosta alkaen kuten kojeistojen ja keskusten oikosulkuvirrat. Oikosulkuvirtojen kuvaajat on rajattu aikavälille 0,01-0,1 s kuvan selkeyden vuoksi, vaikkakin oikosulkuvirran vaikutusaika määräytyy todellisuudessa sen mukaan, kuinka nopeasti kyseisessä tilanteessa suojaus katkaisee sähkönsyötön verkosta. Viimeisenä on esitetty kaapelien termiset kestoisuudet ja muuntajan kytkentävirrat.



Kuva 8.1 Selektiivisyyskäyrästo suojausketjusta pääkojeistolta 5D lähdölle 7D26, johon liittyen esitetään ylivirtasuojien toimintakäyrät, verkon oikosulkuvirrat, kaapelien termiset kestoisuudet ja muuntajan arvioitu kytkentävirtasysäys.

Kuvassa esiintyvien käyrien nimet tarkoittavat seuraavaa:

- '5D04' on pääkojeiston 5D syötön ylivirtarele.
- '5D05' on alakojeiston 6D syötön ylivirtarele.

- '6D30' on toisen alakojeiston 7D syötön ylivirtarele.
- '7D26' on alakojeiston 7D lähdön 26 ylivirtarele.
- '7D26, pj' on lähdön 7D26 jakelumuuntajan syöttämän PJ-keskuksen 2I pääkatkaisija.
- '5D_I_I''k_max' on pääkojeiston 5D suurin oikosulkuvirta.
- '5D_I_Ik_min' on pääkojeiston 5D pienin oikosulkuvirta.
- '6D_III_I''k_max' on alakojeiston 6D suurin oikosulkuvirta.
- '6D_III_Ik_min' on alakojeiston 6D pienin oikosulkuvirta.
- '7D_II_I''k_max' on toisen alakojeiston 7D suurin oikosulkuvirta.
- '7D_II_Ik_min' on toisen alakojeiston 7D pienin oikosulkuvirta.
- '7D26/2I_I''k_max' on PJ-keskuksen 2I suurin oikosulkuvirta.
- '7D26/2I_Ik_min' on PJ-keskuksen 2I pienin oikosulkuvirta.
- '7D26/2I_Ik_min(6kV)' on PJ-keskuksen 2I pienin 6 kV:n puolella näkyvä oikosulkuvirta.
- '6D30, 2xAHXCMK 3x1x800' on lähdön 6D30 kaapelin terminen kestoisuus.
- '7D26, APYAKMM 3x240' on lähdön 7D26 kaapelin terminen kestoisuus.
- '7D26 muuntajan kytkentävirta' on lähdön 7D26 muuntajan kytkentävirta.

Selektiivisyyssäyrästä voidaan tarkastella:

- oikosulkusuojauksen toimintavaatimuksen toteutumista suojausalueen pienimmällä oikosulkuvirralla.
- varasuojausvaatimuksen toteutumista varasuojan ulottuessa aina toisen suojausalueen pienimpään oikosulkuvirtaan.
- suojien välistä selektiivisyyttä suojien toimintakäyrien ja suojausalueiden suurimpien oikosulkuvirtojen perusteella.
- suojauksen reagoimattomuutta muuntajien kytkentävirtasäyksiin.
- kaapelien terminen kestoisuuden alittumista.

Pienimpään oikosulkuvirtaan nähden suojareleelle asetellaan pieni varmuusmarginaali kaapelien virtaa rajoittavan vaikutuksen huomioimiseksi. Marginaali vaihtelee tapauskohtaisesti noin 10...30 % välillä. Ylivirtareleen I>-porras asetellaan yleensä kuitenkin selkeästi pienintä oikosulkuvirtaa pienemmäksi. Myös varasuojan tulee toimia hieman pienintä oikosulkuvirtaa pienemmällä virralla. Suurinta oikosulkuvirtaa käytetään rajaamaan releen suojausalue esimerkiksi muuntajalähdöllä niin, että asetellaan PJ-keskuksen maksimioikosulkuvirtaa isompi virta 6 kV releelle, jolloin suojausalue rajoittuu muuntajan yläjännitenapoihin. Suojausalueiden määrittelyn avulla voidaan suojat asetella selektiivisesti. Suojan toimintakäyrä ei saa leikata muuntajan kytkentävirrän käyrää, jotta vältettäisiin virheelliset laukaisut muuntajaa kytkettäessä verkkoon. Kaapelien terminen kestoisuuden alittuminen voidaan arvioida siten, että käytetään kaapelia syöttävän kojeiston suurinta oikosulkuvirtaa ja katsotaan, missä kohtaa suojan toimintakäyrä leikkaa oikosulkuvirrän käyrän. Leikkauspisteen täytyy jäädä selvästi kaapelin terminen kestoisuuden käyrään nähden joko alas tai vasemmalle. Vastaavasti kojeiston pienimmän oikosulkuvirrän ja suojan toimintakäyrän leikkauspisteen ei saa antaa ylittää

kaapelin termistä käyrää. Leikkauspisteiden välillä suojan toimintakäyrän säilyessä kaapelin termisen käyrän alapuolella säilytetään kaapelin terminen kestoisuus kaapelin oikosulussa.

8.3.2 Muuntajalähtöjen oikosulkusuojaus

Tarkastelualueen muuntajalähdöillä muuntajan suojauksessa vaihtelee neljä erilaista tilannetta, joissa syötetään

- 1) yhtä PJ-keskusta, jossa on PJ-pääkatkaisija.
- 2) kahta PJ-keskusta, joissa on PJ-pääkatkaisijat.
- 3) yhtä PJ-keskusta, jossa ei ole katkaisijaa.
- 4) yhtä PJ-keskusta, jonka syöttökentässä on 6 kV katkaisijaa ohjaava ylivirtarele.

Tilanteessa 1) ei käyttökatkon kannalta ole merkittävää vaikutusta, sillä laukaiseeko keskuksen oikosulun PJ-pääkatkaisija vai 6 kV katkaisija. Tilanteessa 2) on tärkeää, että suojaus on selektiivinen, jotta keskuksen oikosulku ei aiheuta käyttökatkoa toiseenkin keskukseseen. Tilanteessa 3) ja 4) tulee 6 kV katkaisijan laukaista keskuksen oikosulku viiveettä. Seuraavassa tarkastellaan yksittäisten esimerkkien kautta eri tilanteita.

Suurimmassa osassa tarkasteltavan verkon muuntajalähdöistä syötetään tilanteen 1) mukaisesti yhtä muuntajaa, joka syöttää yhtä PJ-keskusta, jonka oiko- ja ylikuormitussuojana toimii keskuksen syöttökentän PJ-pääkatkaisija. PJ-pääkatkaisija toimii muuntajan ylikuormitussuojana ja toision ensisijaisena oikosulkusuojana lukuun ottamatta muuntajan alajännitenapojen ja keskuksen välistä syöttöyhteyttä, joka useimmiten on lyhyt koteloitu kiskosto. KJ-lähtösuojan täytyy toimia ensisijaisesti muuntajaa syöttävän kaapelin ja muuntajan ensiön oikosulkusuojana. Lisäksi KJ-lähtösuojan tulee muodostaa varasuojia PJ-pääkatkaisijalle PJ-keskuksen oikosulkutilanteissa.

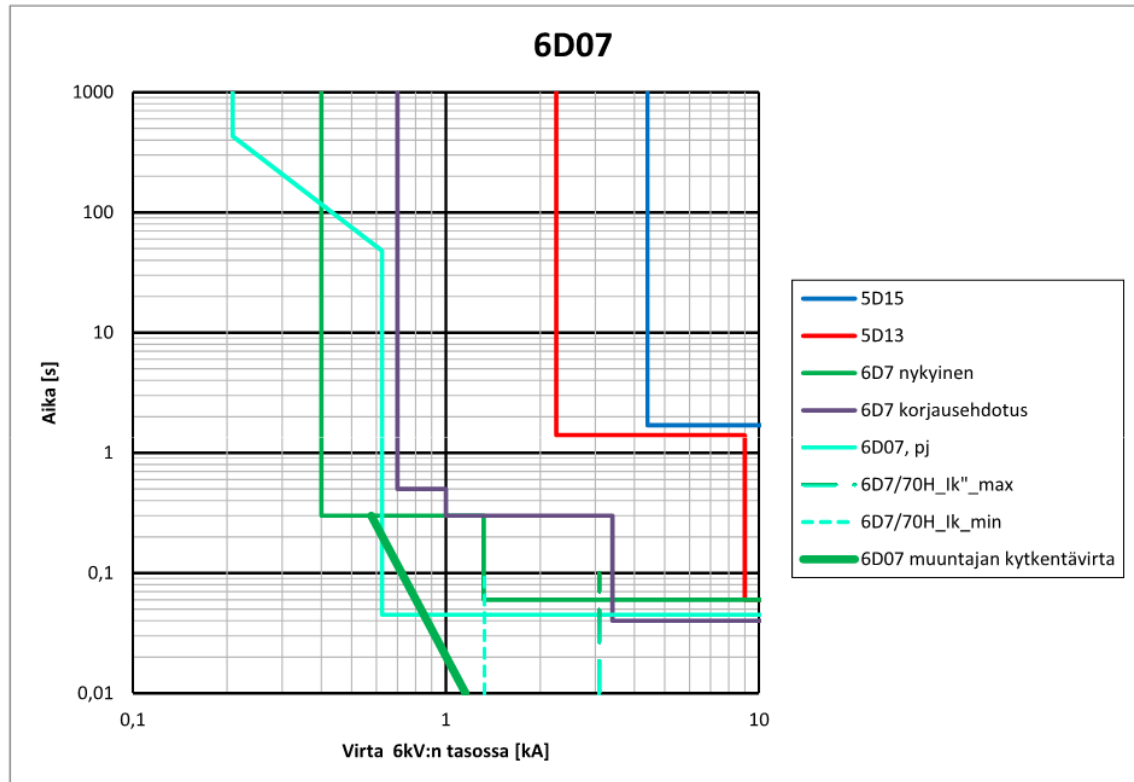
Muuntajan sisäisissä vioissa, kuten kierrosoikosuluissa on mahdollista, ettei oikosulkusuojaus havahdu. Tämä voi ylikuormittaa muuntajaa nopeastikin. KJ-lähtösuojaalla on tarkastelualueen muuntajalähdöissä aina ylikuormitussuoja, jossa on usein myös nopea toiminta suurella ylivirralla. Viimeistään muuntajan sisäiset releet estävät muuntajan vaarallisen ylikuumenemisen. Tämän vuoksi ei ole välttämätöntä asetella ylivirtarelettä toimimaan muuntajan ylikuormitussuojana. Jos ensiön nopea ylikuormitussuoja kuitenkin halutaan toteuttaa, asettelu voidaan tehdä niin, ettei muuntajan nimellisvirta ylitä kaksinkertaisesti edes lyhytaikaisestikaan standardin IEC 60076 suosituksen mukaisesti.

Tarkastelualueella muuntajalähtöjen ylivirtareleet on usein aseteltu toimimaan hidastamattomasti myös muuntajan alajännitepuolen oikosulussa. Toinen porras saattaa olla jopa 1 s viiveellä hidastettu, ja onkin usein aseteltu toimimaan nopeana ylikuormitussuojana. Toiminta ei ole selektiivistä PJ-pääkatkaisijan kanssa, mutta sähkökatko koskee joka tapauksessa samaa muuntajan takaista PJ-verkkoa, joten selektiivisellä toiminnalla ei saavutettaisi varsinaisia hyötyjä. Tämän vuoksi ei näillä lähdöillä ole välttämätöntä tarvetta korjata asetteluja. Jos toiminta halutaan saattaa selektiiviseksi varsinkin, mikäli lähdölle lisätään toinen muuntaja myöhemmin, niin voidaan hetkellisen portaan virta-asetteluksi määrätä toisioissa esiintyvää suurinta oikosulkuvirtaa suurempi

arvo. Vaihtoehtoa kuvastetaan lähdön 6D07 kohdalla taulukon 8.2 asettelumuutoksilla, jolloin toiminta havainnollistuu kuvasta 8.2.

Taulukko 8.2 Lähdön 6D07 ylivirtareleen nykyinen ja vaihtoehtoinen asettelu.

| | I> | I>> | I>>> |
|----------------|------------|--------------|--------------|
| nykyinen | 400A, 0,3s | 1320A, 0,06s | - |
| korjausehdotus | 700A, 0,5s | 1000A, 0,3s | 3400A, 0,04s |



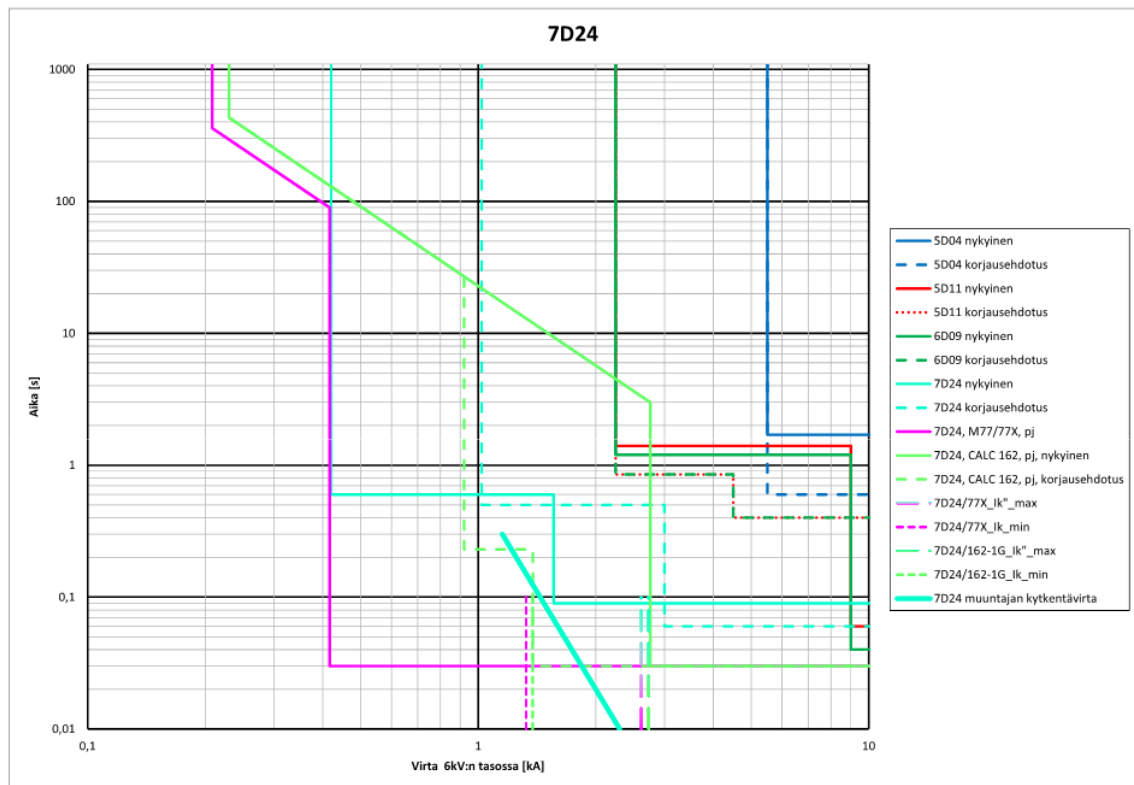
Kuva 8.2 Lähdön 6D07 ylivirtasuojauksen selektiivisyyssäyrästä ja korjausehdotus selektiivisyyden saavuttamiseksi.

Virtamuuntajien mitoitusensiövirta on osassa lähtöjä alle muuntajan nimellisvirran. BBC:n sähkömekaanisissa Sp-ylivirtareleissä ei riitä nykyisillä virtamuuntajilla asetteluvali selektiivisen suojauksen toteuttamiseen. Pelkästään tämän vuoksi ei virtamuuntajia kannata uusia, vaan ennemmin ylivirtareleet. Mutta kuten yllä todettiin, ei tilanteen 1) muuntajalähtöjen oikosulkusuojaukseen ole varsinaisesti tarvetta kehittää.

Tilanne 2) esiintyy kolmella lähdöllä. Esimerkiksi 7D24-lähdöllä syötetään kahdella jakelumuuntajalla kahta PJ-keskusta, joilla on pääkatkaisijat. 162-1G-keskuksen pääkatkaisijan I-portaan asettelu on liian korkea toimiakseen missään tilanteessa. Lähdön 7D24 ylivirtareleen I>>-portaan virta-asettelu on liian pieni, jolloin se ehtii laukaista kumman tahansa keskuksen oikosulussa, jolloin kumpikin keskus pimenee. Taulukossa 8.3 on suojien nykyiset asettelut ja korjausehdotukset, joilla toiminta vastaa kuvan 8.3 tilannetta.

Taulukko 8.3 Lähdön 7D24 KJ- ja PJ- ylivirtareleiden asettelut korjausehdotuksineen.

| | nykyiset asettelut | | korjausehdotus asetteluihin | | |
|--------|--------------------|----------------|-----------------------------|---------------|----------------|
| | I>(L) | I>>(I) | I>(L) | (S) | I>>(I) |
| 7D24 | 420A, t=0,6s | 1560A, t=0,09s | 1020A, 0,5s | | 3000A, 0,06s |
| 162-1G | (käänteisaika) | (2760A, hetk.) | (käänteisaika) | (1035A, 0,2s) | (1380A, hetk.) |
| 77X | (käänteisaika) | (417A, hetk.) | (käänteisaika) | - | (417A, hetk.) |

**Kuva 8.3** Lähdön 7D24 suojauksen selektiivisyyskäyrästä nykyisillä releasetteluilla sekä korjausehdotuksilla selektiivisyyden kehittämiseksi.

Asetteluja korjaamalla KJ-suoja toimii hetkellisesti KJ-kaapelin ja muuntajan ensiön oikosuluissa. PJ-katkaisijat toimivat hidastuksetta keskusten oikosuluissa ja KJ-suoja varasuojana 0,5 s hidastuksella. Muuntajan toisiossa ennen PJ-pääkatkaisijaa tapahtuvan oikosulun laukaisu tapahtuu vasta KJ-suojan 0,5 s hidastetulla portaalla. 162-1G pääkatkaisijan virta-asettelun pienentäminen edelleen vaatisi pääkatkaisijan ja lähtösulakkeiden välistä selektiivisyydestä. Korvattaessa 7D24-lähdön KJ-rele VAMP-releellä voitaisiin ottaa kolmas porras ($I=1800\text{ A}$, $t=0,3\text{ s}$) käyttöön, jolloin toisiossa pääkatkaisijaa edeltävän oikosulun laukaisu nopeutuisi.

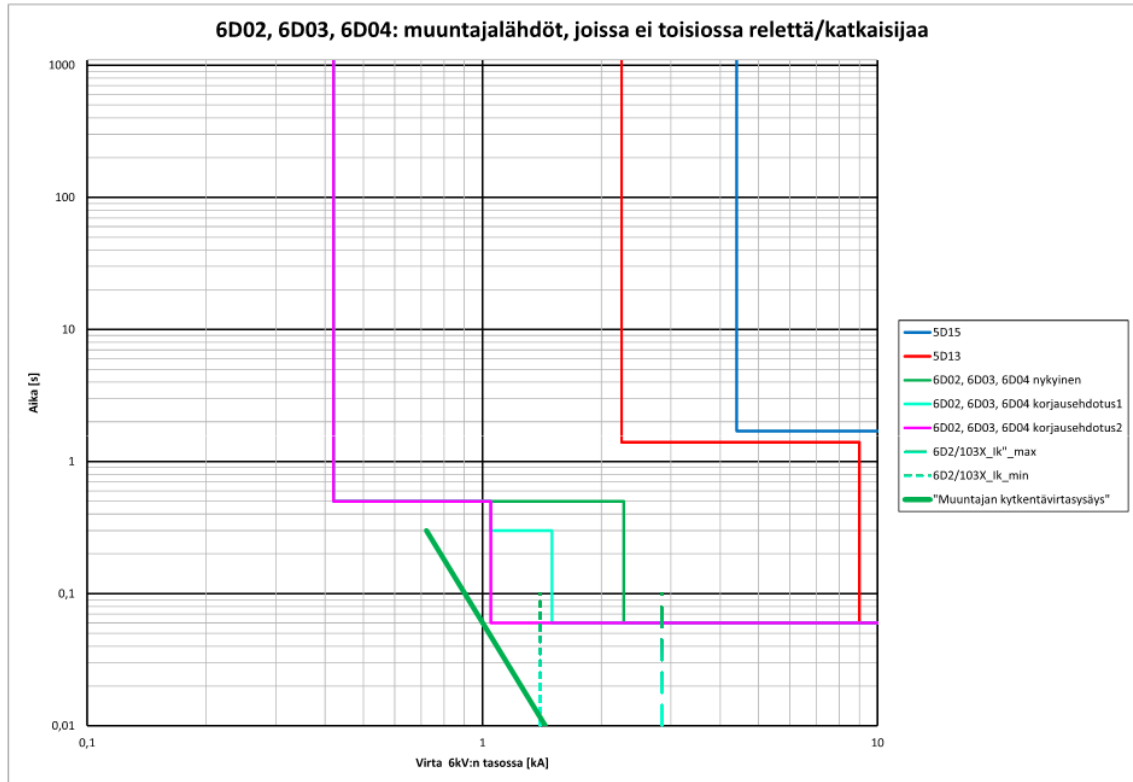
Lähdöllä 7D02 tehdään vastaavanlaiset asettelukorjaukset selektiivisyyden toteuttamiseksi. Huomion arvoista on se, että toinen muuntajista syöttää tähtipisteestään suoraan maadoitettua 400 V keskusta. Keskuksen pienin 6 kV puolella näkyvä oikosulkuvirta ilmenee yksivaiheisessa oikosulussa, jolloin oikosulkuvirta on niin pieni, että selektiivisyydestä 6 kV ylivirtareleellä ei voida tarjota täysin kattavaa varasuojaa. 6D14-lähdöllä syötetään kolmikäämimuuntajan kautta kahta 880 V moottoria, joilla on

omat pääkatkaisijat. Tälläkin lähdöllä 6 kV releen hetkellisportaan virta-asettelua on syytä nostaa yli toision suurimman oikosulkuvirran, jotta toisen moottorin oikosulku ei pysäytä kumpaakin moottoria.

Lähdöillä 6D02, 6D03 ja 6D04 muuntaja syöttää tilanteen 3) mukaisesti PJ-keskusta, jolla ei ole pääkatkaisijaa eikä toisiossa ole ylivirtarelettä. 6 kV lähdön ylivirtasuojan on toimittava PJ-keskuksen oikosuluissa ensisijaisena oikosulkusuojana sekä muuntajan ylikuormitussuojana. Nykyisillä asetteluilla PJ-keskuksen oikosulun laukaisu on mahdollista jäädä vasta 0,5 s hidastetulle portaalle. Korjaukseksi ehdotetaan VAMP-releellä kaikkien kolmen ylivirtaportaan käyttöä ja asetellaan portaat mahdollisemman lähelle muuntajan kytkentävirtasysäystä. Vaihtoehtoisesti 0,3 s hidastetun väliportaan voi korvata hetkellisellä laukaisulla, jos otetaan kytkentävirtalukitus käyttöön. 7D03-lähdöllä on vastaava tilanne, jossa ylivirtareleenä toimii Strömbergin SPAJ 3M5 J3-rele. Releessä on vain kaksi ylivirtaporrasta, joten 0,3 s porras jää pois. Rele ei myöskään sisällä kytkentävirran lukitusta. Taulukossa 8.4 on releiden nykyiset ja korjausehdotusten mukaiset asettelut, joiden toiminta kuvataan edelleen kuvassa 8.4 lukuun ottamatta lähtöä 7D03.

Taulukko 8.4 Lähtöjen 6D02, 6D03, 6D04 ja 7D03 suojauksen releasettelut ja näiden korjausehdotukset *) uusittaessa VAMP-releellä, **) mikäli otetaan kytkentävirtalukitus käyttöön.

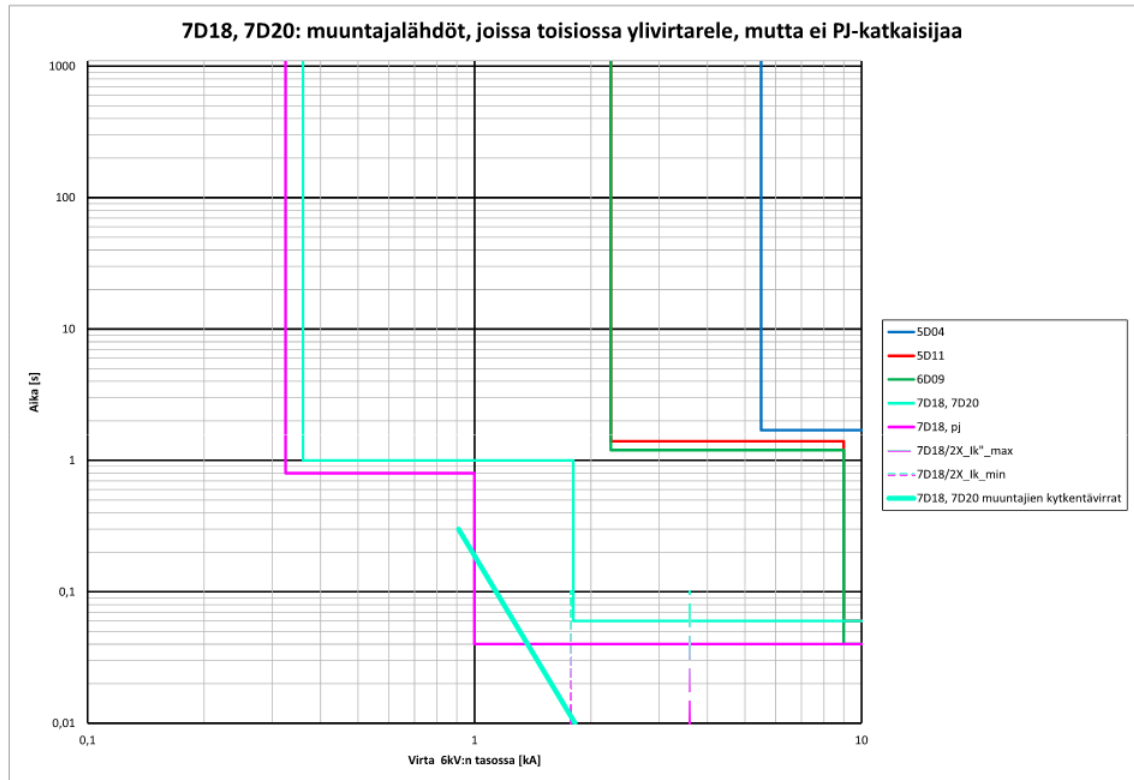
| | Nykyinen asettelu | | Korjausehdotus | | |
|------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| | $I > [A],$ $t = 0,5s$ | $I >> [A],$ $t = 0,06s$ | $I > [A],$ $t = 0,5s$ | $I >> [A],$ $t = 0,3s$ | $I >>> [A],$ $t = 0,06s$ |
| 6D02 | 420 | 2280 | 420 | 1050 | 1500 (1050**) |
| 6D03 | 420 | 2280 | 420 | 1050 | 1500 (1050**) |
| 6D04 | 420 | 2040 | 420 | 1050 | 1500 (1050**) |
| 7D03 | 600 | 2720 | 480 | (1000*) | 1400 (1000**) |



Kuva 8.4 Lähtöjen 6D02, 6D03 ja 6D04 ylivirtareleiden nykyiset ja korjausehdotusten mukaiset toimintakäyrät.

Yllä mainituilla lähdöillä 6 kV lähtökatkaisija toimii osin ainoana suojana PJ-keskuksen oikosulussa, koska 6 kV syöttökatkaisijaa ei voida asettaa pienimmälle oikosulkuvirralle, joten varasuojavaatimus ei täysin toteudu. Tämän vuoksi olisikin tärkeää, että PJ-keskuksella olisi aina oma oikosulkusuojaansa. Muuntajien nimellisvirta on 240 A, joten lähdön 7D04 I>-portaan asettelua pienennetään, jotta muuntajaa ei kuormitettaisi hetkellisestikään yli kaksinkertaisella nimellisvirralla.

Tilanne 4) esiintyy lähdöillä 7D18 ja 7D20, joiden toimintakäyrät näkyvät kuvassa 8.5. Muuntaja syöttää lähdöillä 7D18 ja 7D20 PJ-pääkeskuksia, joilla ei ole pääkatkaisijaa. Keskuksen syöttökiskostoa mitataan virtamuuntajilla ja ylivirtareleellä, joka ohjaa 6 kV lähdön katkaisijaa. Tämän PJ-releen tulee toimia nopeana oikosulkusuoja keskuksen oikosulussa, ja KJ-lähtöreleen varasuojana. 6 kV katkaisijan vikaantumiselle ei kuitenkaan ole täysin kattavaa varasuojaa.



Kuva 8.5 Lähtöjen 7D18 ja 7D20 ylivirtasuojauksen selektiivisyyskäyrästä.

Lähtöjen 7D18 ja 7D20 releasetteluja ei ole tarvetta muuttaa, vaikka näissä KJ-rele voi laukaista vian samanaikaisesti kuin PJ-rele. Sähkökatko kohdistuu kuitenkin kummasakin tapauksessa vain pääkeskukseen, joten tärkeämpää on varmistaa nopea laukaisu. Tässäkin tapauksessa releiden tulee toimia muuntajan ylikuormitussuojana, mikä täyttyy nykyisillä asetteluilla.

8.3.3 Moottorilähtöjen suojaus

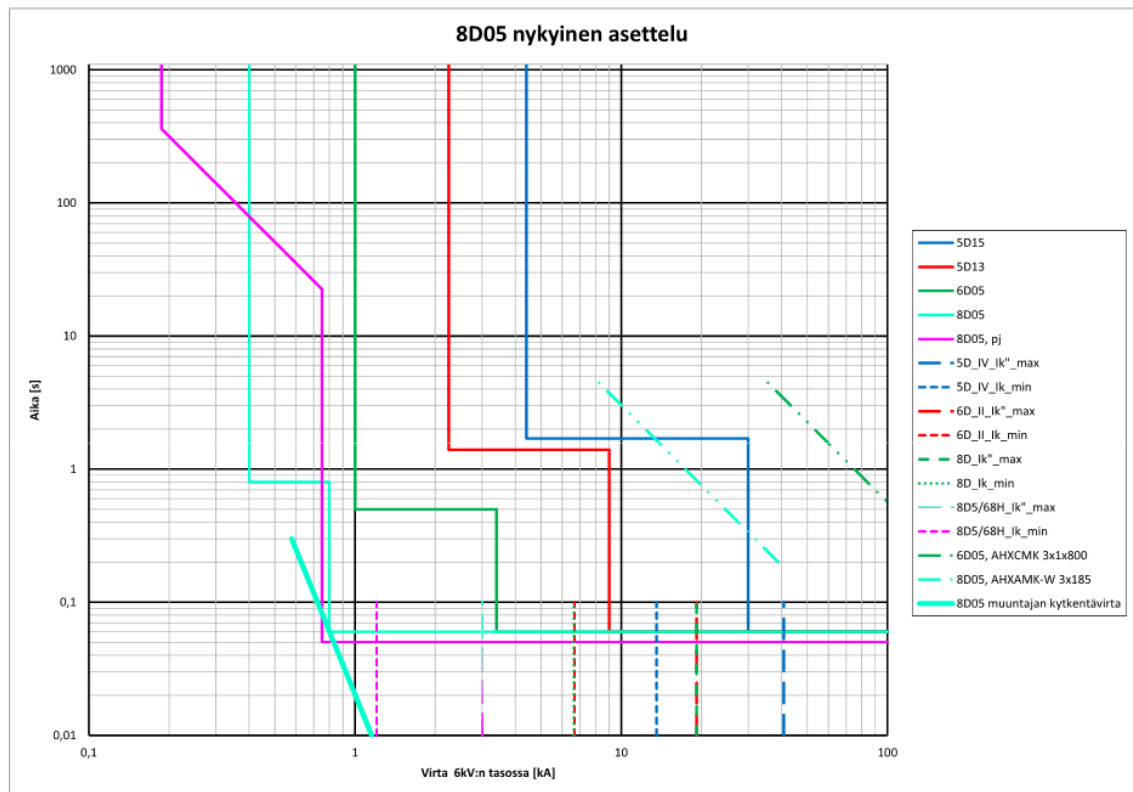
Moottorilähdöillä I>>-porras toimii nopeana oikosulkusuojana ja I>-porras on usein aseteltu ylikuormitus- tai jumisuojana toimivaksi. Epätahtimoottorien ilmoitetut käynnistysvirrat vaihtelevat nimellisvirtaan nähden noin 5...7-kertaisena, minkä yli I>>-portaan virta-asettelu täytyy tehdä. Tahtimoottoreilla käytetään käynnistysmuuntajaa käynnistyksessä, jolloin niiden käynnistysvirrat ovat verraten pienempiä. Tahtimoottorilähdöissä on I>>-portaan asettelu 3...4-kertainen nimellisvirtaan nähden. Asetteluja ei tässä yhteydessä havaita tarpeelliseksi muuttaa muuten kuin poistamalla joillain lähdöillä esiintyvä viive ($t=0,1$ s) I>>-portaasta, jolloin virta-asettelua nostetaan hieman vastaavasti. Muutoksella pyritään säilyttämään käynnistyksessä syntyvän virtapiikin salliminen, ja samalla tekemään I>>-porras mahdollisimman nopeaksi.

8.3.4 Jakeluverkon suojaus

Tarkasteltavan jakeluverkon suojaus koostuu kojeistojen lähtöjen ja syöttöjen muodostamista suojausketjuista. Jokaiselle kojeistolle ja sen syöttöyhteydelle toimii syötön ylivirtarele ja katkaisija oikosulku- ja ylikuormitussuojana. Oikosulkusuojauksen ensisi-

jainen suojausalue on kojeiston kiskosto ja sen syöttöyhteys, joiden oikosulussa tulee I>>-portaan toimia. Lähdön oikosulussa tulee syötön I>-portaan toimia varasuojana. I>-porras toimii myös kaapelin ja kiskoston ylikuormitussuojana. Lähdöt koostuvat muuntaja- ja moottorilähdöistä. Syöttöyhteyksiä kojeistoihin 20D, 24D ja 26D ei tarkastella, sillä tarkastelu vaatisi myös näiden kojeistojen lähtöjen tarkastelua.

Suojausketjuun muodostuu pisimmillään 7D- ja 8D-kojeistojen lähdöillä neljä suojaa. 6D-kojeiston moottori- ja muuntajalähdöillä määrä pienenee kolmeen, ja 5D-kojeistossa suojausketjuun kuuluu ainoastaan kojeiston syöttö ja lähdöt erikseen. Nykyistä jakeluverkon suojausta kuvastaa esimerkiksi 8D05-lähdön suojausketju kuvan 8.6 mukaisesti.



Kuva 8.6 Lähdön 8D05 ylivirtasuojauksen suojausketju.

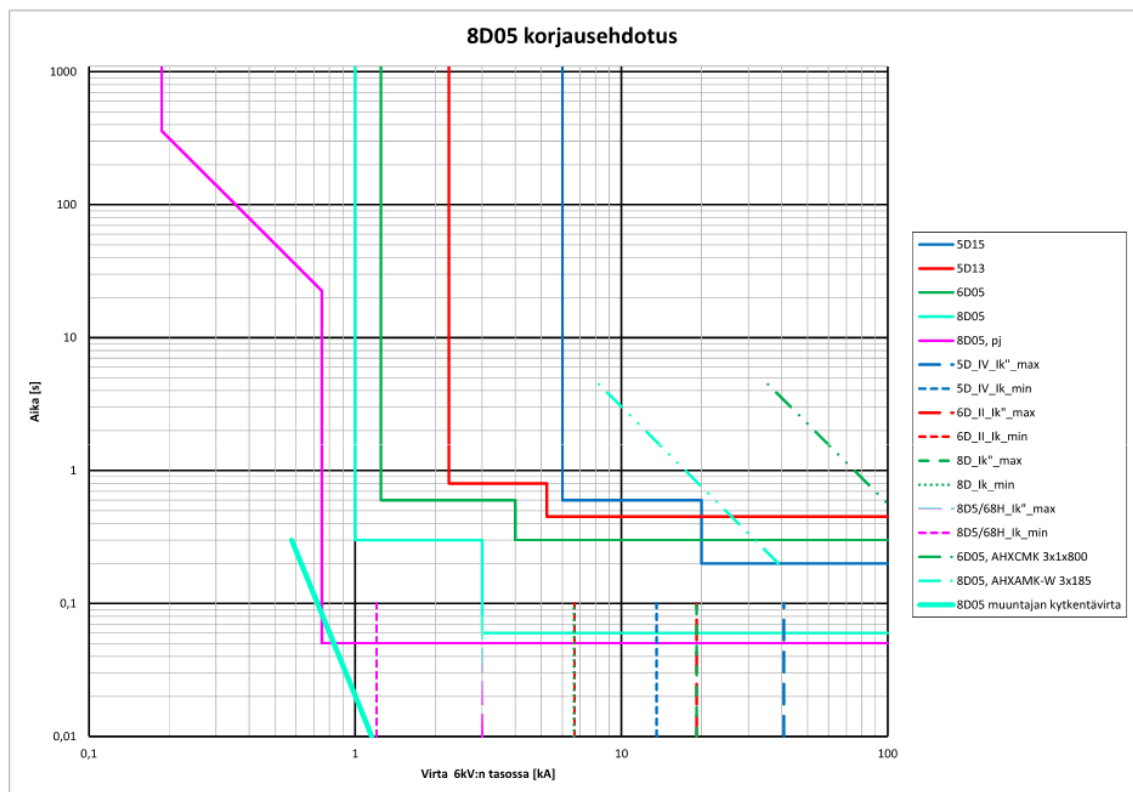
Suojien I>>-portaiden välillä ei ole aikaporrastuksia. 6D- ja 8D- kojeistojen vikavirrat ovat lähes yhtä suuria, joten suojausalueet eivät erotu toisistaan oikosulkuvirraltaan. 8D-kojeiston syötön 6D05 ylivirtareleen I>>-porras havahtuu samanaikaisesti lähdön ylivirtareleen kanssa lähdön oikosulussa. Myös 6D-kojeiston syötön 5D13 I>-porras havahduu 8D-kojeiston oikosulussa sekä 8D-lähdöillä tapahtuvassa oikosulussa. Koska suoji- en välillä ei ole hidastuksia ollenkaan, johtaa 8D-lähdön oikosulku ainakin 8D-kojeiston käyttökatkoon ja todennäköisesti myös 6D-kojeisto-osan käyttökatkoon. Vastaava tilanne vallitsee 7D-kojeistojen suojausketjuissa. 5D- ja 6D-kojeistoissa yksittäisen muuntaja- tai moottorilähdön oikosulku havahduttaa lähdön ja syötön suojat samanaikaisesti, jolloin kojeiston käyttökato on todennäköinen. Suojaus ei toimi selektiivisesti. Vir- taselektiivisen asettelun sijaan joudutaan suojat asettelemaan aikaselektiivisesti pyrkien

mahdollisimman pieneen porrasaikaan suojen välillä. Tämän vuoksi on tärkeää, että jokaisen muuntaja- ja moottorilähdön $I>>$ - tai $I>>>$ -porras on hidastamaton.

5D-kojeiston syötön ja 6D-kojeistoa syöttävien kuristinlähtöjen välillä voidaan käyttää virtaselektiivisyyttä kuristimien rajoittaessa 6D-kojeiston oikosulun virtaa tarpeeksi paljon 5D-kojeiston oikosulun virtaan nähden. 8D-lähdön elektronisen releen ja syötön (6D05) numeerisen releen väliseksi porrasajaksi valitaan 0,25 s. 8D-syötön (6D05) ja 6D-syötön (5D13) väliseksi porrasajaksi valitaan numeerisilla releillä 0,15 s. Releet asetellaan taulukon 8.5 mukaisesti. Uusilla releasetteluilla 8D05-lähdön suojausketjun toimintakäyrät näkyvät kuvassa 8.7.

Taulukko 8.5 8D05-lähtöön ulottuvan suojausketjun releiden uudet asettelu ehdotukset.

| | $I>$ | $t>$ | $I>>$ | $t>>$ |
|------|--------|-------|---------|--------|
| 5D15 | 6000 A | 0,6 s | 20000 A | 0,2 s |
| 5D13 | 2250 A | 0,8 s | 5250 A | 0,45 s |
| 6D05 | 1250 A | 0,6 s | 4000 A | 0,3 s |
| 8D05 | 1000 A | 0,3 s | 3000 A | 0,06 s |



Kuva 8.7 Korjaus ehdotuksen mukaiset toimintakäyrät lähdön 8D05 suojausketjun ylivirtareleistä.

Kuvasta nähdään, että PJ-pääkatkaisija (8D05, pj) toimii viiveettä PJ-keskuksen (68H) oikosulussa ($7D28/17H_{Ik_min}$), ja 6 kV lähtökatkaisija (8D05) hidastettuna (0,3 s) varasuojana. Lähtökatkaisija suorittaa pikalaukaisun muuntajan ensiöpuolen oikosulussa ($\geq 8D5/68H_{Ik''_max}$), jolle tarjotaan varasuoja alakojeiston syötön (6D05) ylivirtareleellä. Suojaus on 5D:n syötön ja 6D:n syöttöjen välillä virtaselektiivinen ja muualla

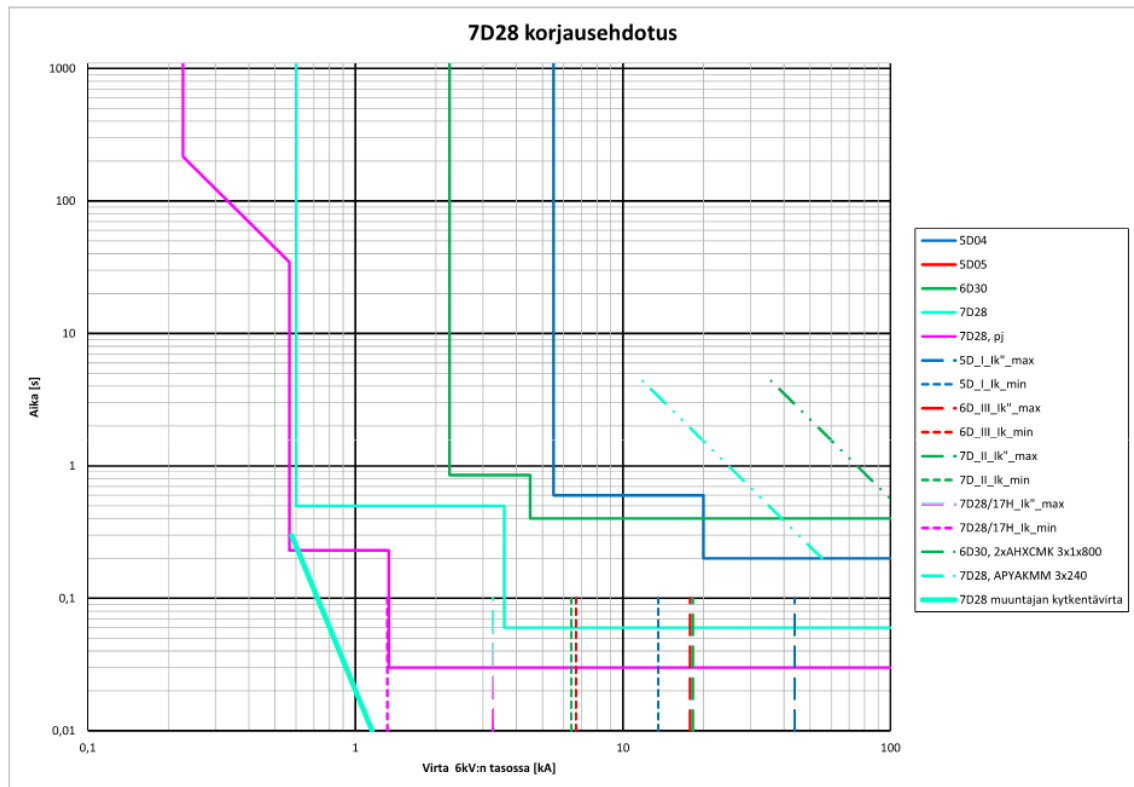
aikaselektiivinen. Suojausalueet peittävät toisiaan aukottomasti niin, että jokaiselle suojalle on varasuoja.

Jokaisessa kojeistossa mukaan lukien myös 5D joudutaan käyttämään aikaporasta kojeiston syötön ja muuntaja-/moottorilähtöjen välillä. 7D-kojeiston I-kiskostoa syötetään 6D-kiskoston I kautta, jossa ei ole muita kuormia. Tällöin 6D:n syötön ja 7D:n syötön välillä ei tarvitse käyttää porrassaikaa. 6D-kiskostossa III on 7D_II-kiskoston lisäksi kuormana valaistusmuuntaja M7/1i sekä vesilaitoksen kojeisto 20D. Valaistusmuuntajan pieni kuorma on mahdollista siirtää 6D_IV-kiskostoon. Vesilaitoksen syöttö voisi olla mahdollista siirtää joko 6D_IV-kiskostoon tai 23D-kojeistoon, josta poistui äskettäin TMP1:n jauhinten tahtimoottorikuorma. Tällöin 7D-lähtöjen osalta selvittää kolmen porrastettavan suojan ketjulla.

Seuraavassa tarkastellaan 7D_II-kiskoston suojausketjua suurimman virta-asettelun omaavalla lähdöllä 7D28. Taulukossa 8.5 ehdotetaan uudet releasettelut. 7D28-lähdön ylivirtarele on sähkömekaaninen BBC ISM 2 ja muut suojareleet ovat numeerisia VAMP 255-releitä. Porrasajoiksi muodostuu 7D28 ja 5D05(6D30) välillä 0,35 s sekä 5D05(6D30) ja 5D04 välillä 0,2 s. Suojien toiminta esitetään kuvassa 8.8.

Taulukko 8.6 7D28-lähtöön ulottuvan suojausketjun releiden uudet asetteluehdotukset.

| | I> | t> | I>> | t>> |
|-------------|--------|--------|---------|--------|
| 5D04 | 5500 A | 0,6 s | 20000 A | 0,2 s |
| 5D05 (6D30) | 2250 A | 0,85 s | 4500 A | 0,4 s |
| 7D28 | 600 A | 0,5 s | 3600 A | 0,06 s |



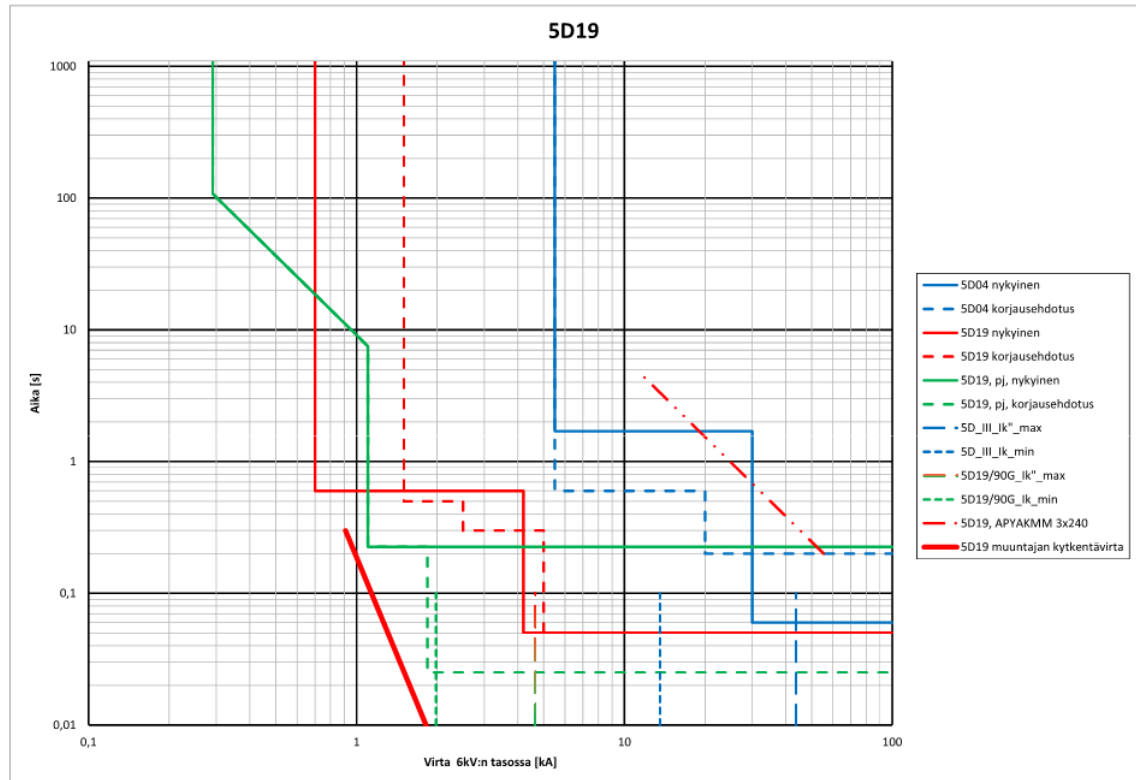
Kuva 8.8 Selektiivisyyskäyrästä 7D28-lähdön suojausketjusta uusilla asetuilla.

Kuvasta nähdään, että PJ-pääkatkaisija (7D28, pj) toimii viiveettä PJ-keskuksen (17H) oikosulussa (7D28/17H_Ik_min) ja 6 kV lähtökatkaisija (7D28) hidastettuna (0,5 s) varasuojana. Lähtökatkaisija suorittaa pikalaukaisun muuntajan ensiöpuolen oikosulussa ($\geq 7D28/17H_Ik''_max$), jolle tarjotaan varasuoja alakojeiston syötön I>-portaalla. Alakojeiston syötön (6D30/5D05) I>>-porras toimii 0,4 s viiveellä kiskoston ja syöttävän kaapelin oikosulussa (7D_II_Ik_min), jolle pääkojeiston syötön (5D04) I>-porras toimii varasuojana viiveellä 0,6 s. 6D- ja 5D-kojeistoissa syöttöjen I>>-porras toimii näin aikaselektiivisesti moottori- ja muuntajalähtöjen varasuojana ja kojeiston ensisijaisena suojana.

Asettelut on tehty normaalissa kytkentätilanteessa laskettujen oikosulkuvirtojen mukaisesti. Osaa 5D-kojeistosta voidaan tarvittaessa syöttää 6D-kojeistosta kuristimien kautta, jolloin tehon syöttösuunta vaihtuu. Tämän varasyöttötilanteen suojausketjua täytyy tarkastella tarvittaessa. 6D-kojeistoon varayhteys otetaan ensisijassa 10D- tai 11D-kojeistoista, mihin syöttö tulee vastaavanlaisesti 15 MVA kuristimien kautta 30 ja 40 MVA päämuuntajilta, joten oikosulkuvirran suuruus on samaa luokkaa. 7D-kojeiston syöttö tapahtuu toissijaisestikin 6D-kojeiston kautta tehonjakojärjestelyillä. 8D-kojeistoon ei ole varayhteyttä. Kojeeistoihin 6D ja 7D on myös muita vaihtoehtoisia syöttöreittejä, joita käytettäessä tulee suojausketjua tarkastella omana tilanteenaan. Tällöin voi olla tarvetta määrittää myös lähtöjen suojille uudet asettelut.

8.3.5 Oikosulkukestoisuuden tarkastaminen

Verkon kaapelien termiset kestoisuudet on tarkasteltu luvussa 8.3.1 kuvaillun tarkastelun perusteella selektiivisyyskäyrästöistä. Tarkastelussa verrataan kaapelin termistä kestoisuutta kaapelin alkupään kojeistossa esiintyvään maksimioikosulkuvirtaan. Vaikka maksimioikosulkuvirtana käytetään ekvivalenttisen termisen oikosulkuvirran sijaan katkaisuvirtaa, ei arvoissa ole suurta poikkeamaa vikavirtalaskennan arvoja vertaillessa, joten tarkastelu voidaan tehdä. Vanhojen asettelujen kohdalla nähdään, että 5D-kojeistossa on mahdollista ylittyä lähtökaapelien terminen kestoisuus syötön varasuojalla, kuten kuvassa 8.9 nähdään. Ensisijaisen suojan toimiessa terminen kestoisuus ei ylity missään tapauksessa. Kuvassa 8.9 on myös esitelty korjausehdotuksen mukaiset asettelut, joilla varasuojauksin toimii nopeammin eikä terminen kestoisuus ole vaarassa ylittyä.



Kuva 8.9 Lähdön 5D19 suojaus ja korjaus ehdotus, jotta lähdön 5D19 kaapelin terminen kestoisuus ei ylittyisi varasuojauksen tapauksessakaan.

Selektiivisyyskäyrästä tapahtuvan tarkastelun lisäksi verrattiin kaapelien 1 s termisiä kestoisuuksia suoraan suurimpaan kaapelia syöttävän kojeiston ekvivalenttisen 1 s termiseen oikosulkuvirtaan. Kojeston terminen oikosulkuvirta ylittää selkeästi ainoastaan lähtöjen 5D21, 5D22 ja 5D23 kaapelien termiset kestoisuudet 1 s arvoissa. Lähtöjen kolmea rinnankytkettyä kaapelia tarkastellaan määräysten mukaisesti jokaista erikseen, sillä jokaisen yksittäisen kolmivaihekaapelin on kestävä oikosulun vaikutukset. Kojeston terminen oikosulkuvirta 1 s arvolla on 42 kA. 3x240 mm² APYAKMM-kaapelin terminen oikosulukestoisuus 1 s arvolla on 24,8 kA, ja yhtälöllä (32) saadaan termiseksi kestoisuudeksi 45 kA kokonaislaukaisuaian ollessa 0,3 s. Kojeston terminen oikosulkuvirta oikosulun kestoajalla 0,3 s lasketaan yhtälöstä (31), kun kuvien 4.13 ja 4.14 perusteella arvioidaan tasavirta- ja vaihtovirtatekijät vikavirtalaskennasta saadun sysäyskertoimen sekä alku- ja pysyvän tilan oikosulkuvirran perusteella. Kojeston termiseksi oikosulkuvirraksi 0,3 s ajalla saadaan 44 kA. Kaapelin terminen kestoisuus riittää 0,3 s laukaisuaikaan asti kyseisillä lähdöillä. Tällöin syötön (5D04/5D15) varasuojaukskin toimii tarpeeksi nopeasti, kun I>-portaalla viive on 0,2 s ja katkaisijan toiminta-ajaksi oletetaan 0,1 s. Suurimmassa osassa verkon lähdöissä kaapelin 1 s terminen kestoisuus ylittää kojeistossa esiintyvän termisen 1 s oikosulkuvirran. Muutamilla lähdöillä kestoisuus alittuu alle 10 %. Kun kojeistojen syötöissä ylivirtareleen hitaamman I>-portaankin viive jää alle 0,9 s ei ole vaaraa, että kaapelien termisiä kestoisuuksia ylitetään varasuojallakaan.

8.3.6 Ylivirtasuojaustarkastelun tulokset

6 kV verkko koostuu yleensä yhden muuntajan lähdöistä, jolloin PJ-keskuksen vika ei aiheuta sähkökatkoa muille keskuksille. Tällöin selektiivisyydellä PJ-katkaisijan ja lähtösuojan välillä ei ole vastaavaa merkitystä kuin kahden keskuksen lähdöillä. Kattava ylikuormitus- ja oikosulkusuojaus voidaan toteuttaa helpommin, kun muuntajan toisiossa käytetään omaa suojalaitetta. Lähdön suoja voidaan asettaa vapaammin ilman, että muuntajan kytkentävirtasysäys tuottaa ongelmia. Lisäksi PJ-keskuksen oikosulun varasuojausvaatimus on helppo toteuttaa. Uusi reletekniikka mahdollistaa kytkentävir-tasysäyksen lukituksen hetkellisellä portaalla sekä laajan ja tarkemman asettelun kolmella portaalla ja isommilla asettelualueilla, jolloin muuntajalähdön suojauksessa ei tarvitse tehdä kompromisseja eri vaatimusten välillä, ja tuloksena saadaan kattava, nopea ja selektiivinen suojaus.

Aikaselektiiviseen suojaukseen siirryttäessä on tärkeää arvioida laukaisuaikojen pitenemisen vaikutuksia. Nykyisellä laitteistolla 7D:n mekaaniset releet aiheuttavat suurimman porrasajan kasvun. Jos katkaisijan kokonaistoiminta-ajaksi oletetaan 100 ms, niin 7D-kojeiston vian laukaisu voidaan asettaa tapahtumaan 0,5 s kokonaisviiveellä. 8D:ssä vastaava viive on 0,4 s ja 6D-kojeiston eri kiskostoissa 0,3/0,5/0,55 s. 5D-kojeiston vika laukaistaan normaalissa käyttötilanteessa 0,3 s viiveellä, ja seisokitilanteessa 110 kV toisen liityntäjohtoon varassa pienimmän 2-vaiheinen oikosulun laukaisu voi viivästyä 0,7 s. Kaapelien termiset kestoisuudet eivät ole vaarassa ylittyä. Kojeiston oikosulussa valokaarivauriot kuitenkin kasvavat oikosulun kestoajan pidetessä. 5D- ja 6D-kojeistojen ja niiden välisten kuristimien lisäsuojana käytetään valokaarisuojausta, jonka toiminta-aika on muutamia millisekunteja niin, että oikosulun laukaisuaika muodostuu lähes yksinomaan syöttökatkaisijan kokonaistoiminta-ajasta ollen alle 100 ms. Näin ollen voidaan todeta, ettei suojauksen muuttaminen aikaselektiiviseksi aiheuta merkittävää vaurioiden kasvamisvaaraa suojausketjun alkupään kojeistoissa.

Seuraavassa esitetään vaihtoehtoja, joilla porrassaikoja voitaisiin lyhentää. Mikäli 7D:n ja 8D:n releet uusitaan numeerisilla releillä, voidaan porrassaikana käyttää 0,15 s kaikkien suojien välillä. Tällöin kokonaislaukaisuaajat kojeistovioissa ovat seuraavat: 0,3 s (7D), 0,3 s (8D), 0,3/0,45 s (6D) ja 0,3/0,6 s (5D). Suositeltavaa on käyttää samaa relevalmistajaa ja –mallia, jolloin suojausketjun releiden havahtuminen on mahdollisimman samanaikaista. Samassa yhteydessä olisi luonnollista asentaa valokaarisuojaus kojeistoihin 7D ja 8D.

Selektiivinen ylivirtasuojaus kaikissa kytkentätilanteissa voitaisiin toteuttaa lukitussuojauksella, jossa lähtöjen I>>-portaat lukitsevat havahtuessaan syöttökatkaisijan I>>-portaan. Tällöin pikalaukaisuportaat toimisivat selektiivisesti suojausalueensa viassa. Ensimmäisen ja viimeisen suojan väliseksi porrassajaksi muodostuisi 0,1 s, mikäli lukitukset toteutetaan suojausketjun kaikkien suojien välillä niin, että esimerkiksi 7D28 lukitsee 6D30:n, 5D05:n ja 5D04:n. Johdotustyö muodostuisi kyseisessä verkossa erittäin laajaksi, jolloin suojauksesta tulisi monimutkainen ja kallis toteuttaa. Lisäksi lukitukset täytyisi huomioida joka kytkentätilanteessa erikseen. Vaihtoehtoisesti voitaisiin

käyttää kojeistokohtaista lukitusta niin, että lähdöt lukitsevat ainoastaan oman kojeiston syötön, jolloin toteutus yksinkertaistuisi huomattavasti. 0,1 s porrassaika kertautuisi kuitenkin kojeistojen välillä, jolloin ero numeerisilla releillä käytettävään 0,15 s porrassaikaan kapenee. Mikäli lukituksiin päädytään, tulee muistaa ottaa katkaisijan vikasuojia käyttöön, jotta varasuojaus toimisi. Lukitussuojaukseen siirtyminen edellyttää 7D- ja 8D-kojeistojen osalta relemodernisointia.

8.4 Maasulkusuojauksen tarkastelu

Kojeistojen jokaista kiskostoa mittaavat nollajännitereleet ilmaisevat maasulun päämuuntajan takaisessa verkossa, ja toimivat hälyttävänä suojana koko verkon osalta, mikäli lähtöreleistä yksikään ei erota vikaantunutta lähtöä. Nollajännite mitataan jännitemuuntajien avokolmiokytkennästä muuntosuhteella 6000:100/3 V. Releen mittaama jännite on tällöin 100 V suorassa maasulussa ($R_f = 0$). Jännitemuuntajien asettelut ovat 30...40 V aikahidastuksella 2 s.

Tarkastelualueella 24/68 lähdöissä on maasulun virtarele, joka on useimmiten suunnattu. Suurin osa lähtösuojista on 5D-, 6D- ja 8D-kojeistoissa. Maasulun laukaisevia näistä ovat 5D- ja 6D-kojeistojen kaikki releet sekä 7D-kojeiston yksi rele. 8D-kojeiston lähdöistä toinen on hälyttävä ja toinen laukaiseva. 5D-kojeiston kolmella lähdöllä maasulkuvirtaa mitataan vaihevirtamuuntajilla. 5D12-lähdön 400/1 A virtamuuntajilla käytetään summakytkentää. Lähdöillä 5D13 ja 5D19 virtamuuntajien 1500/5 ja 1000/5 A toisiovaihevirratt viedään summauspiireille, joiden ulostulona saadaan summavirratt 1 A tasossa. Muissa lähdöissä käytetään kaapelivirtamuuntajia muuntosuhteilla 10/1, 30/1, 70/1 ja 100/1 A. Hiomakoneiden 5D21, 5D22 ja 5D23 lähdöissä käytetään differentiaalisuojia, jotka toimivat myös maasulkusuojina kyseisissä lähdöissä. (Relekoestuspöytäkirjat ja relekortit 2013; Halminen 2014; Sähkökaaviot)

Tarkastelualue jakautuu kahteen galvaanisesti erilliseen päämuuntajien M6 ja M7 takaiseen verkkoon, jota tarkastellaan normaalissa kytkentätilanteessa yksivaiheisen maasulun osalta. Tehtaan vikavirtalaskennassa on määritetty verkkojen nollajännitteet ja maasulkuvirratt vikaresistansseilla 0 ja 500 Ω sekä lähtöjen tuottamat maasulkuvirratt 0 Ω vikaresistanssilla. Ilman vikaresistanssia verkon nollajännite on vaihejännitteen suuruinen eli 6 kV verkossa 3,46 kV, joka saadaan myös yhtälöillä (34) ja (36). 500 Ω vikaresistanssin maasulussa nollajännite pienenee yhtälöiden (35) ja (36) mukaisesti 1,55 kV asti. Verkkojen suorassa maasulussa tuottamat maasulkuvirratt ovat 6,6 A (M6) ja 13,8 A (M7) normaalissa kytkentätilanteessa. 500 Ω vikaresistanssilla virratt ovat 4,8 A (M6) ja 6,2 A (M7). Lähtöjen tuottamat maasulkuvirratt ovat suurimmassa osassa lähtöjä alle 1 A. (Verkostolaskelmat 2013)

8.4.1 Nykyisen suojauksen toiminta

7D-kojeiston kiskoston I nollajännitereleen asettelu 40 V vastaa 40 % verkon vaihejännitteestä eli 1,39 kV. Nollajännitettä vastaava vikaresistanssi on

$$R_f = \frac{U_v}{I_e} \sqrt{\left(\frac{U_v}{U_0}\right)^2 - 1}, \quad (42)$$

joka saadaan johdettua yhtälöistä (33), (35) ja (36). Vikaresistanssiksi saadaan 570 Ω . Vastaavasti 7D-kojeiston II-kiskon nollajänniterele tunnistaa 38 V asettelulla 610 Ω vikaresistanssin maasulun. Muissa kojeistoissa asettelu on 30 V, joka vastaa 800 Ω vikaresistanssia. Sähköturvallisuusmääräysten vaatimus 500 Ω vikaresistanssiin asti tunnistettavasta maasulusta täyttyy.

Vikavirtalaskennasta saatujen verkon ja lähtöjen maasulkuvirtojen perusteella muodostettiin lähtökohtaisille virtareleille virta-asettelun ylä- ja alarajat luvun 6.2.2 mukaisesti. Raja-arvojen perusteella tarkastettiin nykyisten lähtöreleiden toiminta. Neljässä lähdössä suojareleet toimivat oikein. Lisäksi kahdeksan lähdön kohdalla suojarele toimii oikein normaalissa kytkentätilassa, mutta virta-asetteluja pienentämällä voidaan niiden toimintaa parantaa kytkentätilanteen muuttuessa ja vikaresistanssin ilmetessä. Kuudessa lähtöreleessä virta-asettelu on liian suuri, jolloin rele ei tunnista edes suoraa maasulkua. 6D13-, 6D14-, ja 6D19-lähdöissä riittää pelkästään releasettelujen korjaus. Sen sijaan 5D13-lähdössä vaihevirtamuuntajan muuntosuhde on liian suuri eikä relettä voida asetella oikein. Lisäksi lähdön suuntarele on aseteltu väärin mittaamaan resistiivistä maasulkuvirtaa kapasitiivisen sijaan. 5D12- ja 5D19-lähdöissä vaihevirtamuuntajien muuntosuhde on tarpeeksi pieni, jotta releiden virta-asetteluja pienentämällä voidaan suora maasulku tunnistaa. Summavirtamittauksen tarkkuus pienillä virroilla on kyseenalaista, ja suositeltavampaa olisikin kaapelivirtamuuntajien hankinta, jolloin releet voidaan asetella toimimaan luotettavasti myös vikaresistanssin ilmetessä.

Yhden virtareleen kohdalla asettelu on pienempi kuin lähdön tuottama maasulkuvirta; maasulun sattuessa muualla verkosta rele pudottaa lähdön pois. Erään releen kohdalla ilmeni, että johtojen liittimet ovat auki eikä rele tällöin ohjaa laukaisua eikä hälytystä. Yhden releen ohjaus on vaihdettu laukaisevasta hälyttäväksi, koska rele havahtui suotta. Tämän lähdön kohdalla on syytä tarkastaa kaapelin suojavaipan läpivienti kaapelivirtamuuntajista.

8.4.2 Suojauksen kehittäminen

Suuressa osassa verkkoa maasulkuun havahtuvat vain nollajännitereleet. Nollajännite ilmenee koko galvaanisen verkon alueella, jolloin vikapaikkaa joudutaan hakemaan laajalla alueella. Maasulkusuojauksen parantamiseksi tulisi lähtökohtaisen suojauksen osuutta verkossa lisätä. Tämän toteuttamiseksi määriteltiin lähtökohtaiset virtareleiden asettelurajat myös niille lähdöille, joissa ei ennestään ole virta- tai suuntarelettä.

Tarkastelualueen verkossa ainoastaan 5D13-lähdössä ylärajan ja alarajan välinen erotus on negatiivinen, jolloin siinä ei voitaisi käyttää suuntaamatonta virtarelettä. Raja-arvot laskettiin myös kytkentätilanteen vaihtuessa niin, että pisin eli suurimman maasulkuvirran tuottava yksittäinen lähtö kyseisessä verkossa irtikytetään. Tässä kohtaa oletettiin, että kojeistojen 5D, 6D, 7D ja 8D väliset yhteydet säilyvät kuitenkin ennallaan.

Vaikka suuntaamaton virtarele toimii yllä mainituissa tilanteissa, on suositeltavaa käyttää suunnattua virtarelettä kojeistojen välisissä yhteyksissä. Tällöin varmistetaan toiminta kytkentätilanteen vaihtuessa enemmältikin, kun virta-asetuksena voidaan käyttää pienempää arvoa. Virta-asetteluksi voidaan siten kaikissa lähdöissä 5D03-lähtöä lukuun ottamatta asetella 2,1 A. 5D03-lähdössä on jo suuntaamaton virtarele, jolle suositeltava virta-arvo on 3 A, sillä lähdön itsensä tuottama virta suorassa maasulussa on 2,1 A. Noin 30 % varmuusmarginaalilla virta-asettelun ja lähdön tuottaman virran välillä pyritään huomioimaan muun muassa moottoreiden maakapasitanssien maasulkuvirtaa kasvattava vaikutus. Asetteluarvoilla toiminta säilyy myös, mikäli lähdön liitântäkiskoa vaihdetaan erottimella toisen päämuuntajan verkkoon. Näillä lähtöjen asetteluehdotuksilla toiminta tarkastettiin myös 500 ohmin vikaresistanssilla toimivaksi. Releiden aika-asetteluiksi ehdotettiin yksittäisillä kuormalähdöillä 0,2 s, jota hidastetaan kojeistojen syöttöyhteyksissä 0,2 s portain niin, että maasulkusuojaus toimisi aikaselektiivisesti.

5D- ja 6D-kojeistoissa täysin lähtökohtainen suojaus vaatisi kaapelivirtamuuntajien asentamista ja johdottamista 17 lähdössä. 7D-kojeistoissa vastaava suojaustaso vaatisi 23 lähdön kohdalla sekä maasulkureleen että kaapelivirtamuuntajan lisäystä. 8D:ssä vain lähdöstä 5 puuttuu maasulkurele ja kaapelivirtamuuntaja.

Suunniteltaessa lähtökohtaisen suojauksen lisäämistä tulisi huomioida, millä laajuudella uudistuksia aiotaan toteuttaa. Vian haun helpottamiseksi ensimmäinen askel olisi rajata vian sijainti kojeistokohtaisesti. Tämä voitaisiin toteuttaa alakojeistoja syöttävien lähtöjen suuntareleillä hälyttävästi, mikäli ei haluta koko kojeisto-osan sähkökatkoa yksittäisen lähdön maasulussa. Maasulun vaikutusajan lyhentämiseksi suositeltavampaa olisi lisätä maasulun laukaisua lähtökohtaisesti. Tämä kohdistuisi ensi sijassa moottori- ja muuntajalähtöihin, jotta laukaisu rajautuisi mahdollisimman pienelle vaikutusalueelle. Myös kaapelin pituus ja ikä voidaan huomioida, sillä pitkät ja vanhimmat kaapelit ovat todennäköisimpiä vikaantumaan. Suojausta voisi tämän jälkeen täydentää kojeistosityttöjen laukaisevalla suojauksella. Kun koko verkko saataisiin lähtökohtaisen laukaisun piiriin, niin ketjun selektiivisyys voitaisiin toteuttaa käyttämällä vähintään 0,2 s hidastuksia releiden välillä syöttöketjussa. Tällöin nollajänniterele toimisi viimeisenä hälyttävänä varasuojana 2 s kuluttua maasulusta. Nollajännitereleiden asettelut voisivat olla pienempiäkin, esimerkiksi 15 V, jotta maasulku tunnistettaisiin suurella vikaresistanssilla jo aikaisessa vaiheessa.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena on ollut tarkastaa UPM Rauman keskijännitejakuverkon oiko- ja maasulkusuojauksen selektiivistä toimintaa. Tarkastelu keskittyi PK1:n ja Hiomon jakeluverkkoon, jonka selektiivisyyttä pyrittiin arvioimaan, muodostamaan mahdolliset korjausehdotukset releasetteluihin sekä tunnistamaan laitehankintatarpeet. Lisäksi käytiin läpi tehtaan verkossa ilmenneitä vikatapauksia. Tutkimusten pohjalta tehtaalla voitaisiin arvioida koko verkon kannalta suojauksen kehittämistä jatkossa.

Tarkasteltavan verkon osan ylivirtasuojauksen toimii nopeasti kaikissa oikosulkutilanteissa, mutta toiminta on epäselektiivistä. Toiminta perustuu virta-asetteluihin, joilla on pyritty varmistamaan oikosulun nopea laukaisu. Haittapuolena on, että lähimmän suojan lisäksi usein ainakin edellinen suoja suorittaa laukaisun yhtäaikaaisesti. Syötettäessä lähdöllä yhtä jakelumuuntajaa ja sen pääkeskusta, ei epäselektiivisyys aiheuta laajempaa käyttökatkoa. Sen sijaan kahden muuntajan lähdoilla katko laajenee kahteen pääkeskukseen, vaikka oikosulku on vain toisessa keskuksessa. Suurempi ongelma liittyy jakeluverkon lähdön ja sitä edeltävien syöttöjen suojien väliseen epäselektiivisyyteen, jolloin käyttökatko ilmenee vikaantuneen johtolähdön sijaan kaikissa kojeisto-osan/osien lähdoissa. Tällöin vaikutukset koko prosessilinjan toiminnalle ovat suuremmat, ja alkuperäisen vian paikallistaminen vaikeutuu.

Nykytilanteessa voidaan selektiivisyyteen pyrkiä osin virtaselektiivisyydellä, mutta pääosin aikaselektiivisyydellä. Normaalissa käyttötilanteessa pääkojeiston 5D ja alakojeiston 6D välisten vikapaikkojen oikosulkuvirtaerot mahdollistavat pääkojeiston syöttöjen virta-asettelut niin, että nopea suojaporras ei ulotu alakojeistoon. Syöttöä joudutaan kuitenkin hidastamaan pääkojeiston muiden lähtöjen takia. Alakojeistoissa lähtöjen ja kojeistoyhteyksien välillä ei niin ikään päästä virtaselektiivisyyteen vaan suojille tarvitsee määritellä porrasajat aikaselektiivisyyden toteuttamiseksi.

Nykyisillä ylivirtareleillä voidaan suojausketjun välisten suojien toimintaa porrastaa ajan suhteen, jolloin voidaan toteuttaa aikaselektiivinen suojaus. Tällöin laukaisuajat kasvavat varsinkin 6D-kojeiston oikosulussa, jolloin vauriot voivat kasvaa. Käytetty kojeistotyyppi ja vähäöljykatkaisijat aiheuttavat lisääntyvän vaaran, mikäli sähkötilassa on henkilöitä oikosulun sattuessa. Toisaalta 6D-kojeistossa on lisäsuojana nopea valokaarisuojaus, jonka tulisi toimia kojeistossa esiintyvässä oikosulussa. 7D- ja 8D-kojeistojen relemodernisoinnilla voidaan suojauksen nopeutta parantaa koko verkossa. Käyttämällä samanlaista reletekniikkaa kuin aiemmin releiltään uusituissa kojeistoissa varmistetaan suojien yhtäläinen havahtuminen ja sitä myötä nopea ja selektiivinen oikosulkusuojaus.

Maasulkusuojaus kykenee luotettavasti tunnistamaan verkossa esiintyvät yksivaiheiset maasulut määräysten vaatimukset täyttäen. Vian paikallistaminen määräysten edellyttämässä ajassa voi kuitenkin muodostua haasteelliseksi, jolloin maasulun poiskytkeminen voi edellyttää laajaa sähkökatkoa. Lähtökohtaista maasulkusuojausta lisäämällä voidaan nopeuttaa vian paikallistamista ja poiskytkentää. Nykyisten lähtösuojujen asetteluissa ja osin mittaustekniikassa on puutteita, jotka tulisi korjata oikean toiminnan saavuttamiseksi. Lähtökohtaisen suojauksen lisääminen edellyttää uusia releitä ja kaapelivirtamuuntajia. 5D- ja 6D-kojeistoissa riittäisi kaapelivirtamuuntajien hankinta, mutta 7D- ja 8D-kojeistoissa täytyy myös releet uusia.

Oiko- ja maasulkusuojauksen osalta on esitetty uudet releasettelut, joilla nykyistä suojauksen toimintaa voidaan korjata selektiivisemmäksi. Lisäksi on esitelty, mitä laitteistoa uusimalla voidaan suojausta entisestään parantaa. Uusia releitä varten on ehdotettu erikseen asetteluarvot. Tarkasteluissa käytetyt menetelmät on pyritty havainnollistaa niin, että vastaavia tarkasteluita voitaisiin tehtaalla suorittaa eri kohteisiin jatkossa. Lisäksi case-tarkastelussa syntynyttä taulukkolaskenta-asiakirjaa voidaan soveltaen käyttää pohjana muiden verkon osien tarkasteluun huomioimalla taulukkoon syötettävissä verkon rakenne suojausketjua määrittäessä ja laitteiden nimellis- ja asetteluarvojen muutokset.

Tarkastelussa löytyneisiin ongelmakohtiin olisi syytä kiinnittää huomiota erityisesti tehtaan keskijänniteverkon vanhimmissa osissa, joissa tarkasteluita ei ole tehty verkon muuttuessa. Verkon relemodernisointia tehdään lähinnä kunnossapidollisista syistä, mutta samassa yhteydessä kannattaa uusien suojareleiden uudet toiminnot pyrkiä hyödyntämään. Tässä yhteydessä on viisasta toteuttaa selektiivisyystarkastelu uusien toimintojen asettelemiseksi. Samalla on syytä harkita etenkin lukitussuojauksen toteuttamista ja maasulkusuojauksen kehittämistä lähtökohtaiseksi.

Tarkastelussa yhdeksi huomion kohteeksi kiinnittyi lähtötietojen ja vikatapauksen selvittämisen vaikeus. Suojauksesta voisi laatia päämuuntajittain tai kojeistokohtaisesti suojauskaaviot, joissa esitettäisiin suojaustoiminnot ja suojauslaitteet asetteluineen. Lisäksi kojeistokohtaiset pääkaaviot tulisi pitää ajan tasalla. Vikatapauksen kohdalla voisi pyrkiä tilastoimaan myös epäselektiiviset suojaustoiminnot, ja kirjaamaan ylös kaikki oikosulkuun ja maasulkuun johtaneet tilanteet. Kaavioiden avulla suojausjärjestelmän tarkastelu ja muutostarpeen arviointi selkeytyisi. Kattavan häiriötilastoinnin avulla voitaisiin arvioida syy-seuraussuhteita, häiriökustannuksia ja suojauksen kehittämistä taloudellisesta näkökulmasta.

Selektiivisyyttä on tarkasteltu lähinnä sähköverkon toiminnan kannalta yleisiä jakeluverkon suojauksen periaatteita noudattaen. Työn tavoitteiksi ei varsinaisesti määritelty prosessin huomioimista, mutta selektiivisen suojauksen merkityksen kannalta vaikutukset prosessiin olisi voitu tuoda yksityiskohtaisesti esiin.

LÄHTEET

Ahonen, Mikko. 2013. Sähkökäytön ja -töiden johtaja, UPM Rauma. Rauma. Haastattelu 5.12.2013.

Ahonen, Mikko. 2014. Sähkökäytön ja -töiden johtaja, UPM Rauma. Rauma. Yksityinen kirjeenvaihto ja haastattelut 2013-2014.

Aro M, Elovaara J, Karttunen M, Nousiainen K, Palva V. Suurjännitetekniikka. 3. muuttamaton painos. Jyväskylä 2011, Otatieto. 520 s.

Automaatiokunnossapidon henkilöstö. 2014. UPM Rauma. Rauma. Haastattelut 2013-2014.

Bergman, Jouni. 2014. Projektisuunnittelija, UPM Rauma. Rauma. Haastattelut 2013-2014.

Elovaara J, Haarla L. Sähköverkot 2: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. 1. painos. Helsinki 2011, Otatieto.

Frantti P. Teollisuuslaitoksen keskijänniteverkon oikosulkuvirrat ja niiden hallintalaitteet. Diplomityö. Tampere 1989. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto.

Halminen, Kai. 2014. Automaatiokunnossapidon asentaja, UPM Rauma. Rauma. Yksityinen kirjeenvaihto 2014.

Huotari K, Partanen J. Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen. Opetusmoniste 3. Lappeenranta 1998, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto. [WWW]. [Viitattu 15.9.2013]. Saatavissa: https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0500/luennot/teollisuusverkkojen_oikosulkuvirrat.pdf

Häiriöraportti 18.9.2006. Rauma. Sisäinen raportti.

IEC 60909 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems. First edition. Genève 2001, International Electrotechnical Commission (IEC).

Indoor current sensor KECR 17.5 AC1. 2005, ABB. [WWW]. [Viitattu 7.3.2014]. Saatavissa:

[http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/0efc0f4e2fa3eef7c12572740030e0e1/\\$file/KECR%20en%202005.10.10_a.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/0efc0f4e2fa3eef7c12572740030e0e1/$file/KECR%20en%202005.10.10_a.pdf)

KEVA 24 A Indoor voltage sensor. 2012, ABB. [WWW]. [Viitattu 7.3.2014]. Saatavissa:

[http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/ae8a38de4b6fcb33c1257b2000397bcb/\\$file/KEVA_24_A_1VLC000583_Rev.1_en_2013.02.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/ae8a38de4b6fcb33c1257b2000397bcb/$file/KEVA_24_A_1VLC000583_Rev.1_en_2013.02.pdf)

Lehto K. Kartoitus teollisuuden sähköjakelun häiriöistä. Diplomityö. Tampere 2002. Tampereen teknillinen korkeakoulu. [WWW]. [Viitattu 5.3.2014]. Saatavissa: http://hopealehmus.dyndns.org:8080/home/nousjo/public_html/pdf/rap75.pdf

Maadoitusmittauksen loppuraportti. 2013. Rauma. Sisäinen raportti.

Maasulkusuojaus keskijänniteverkossa. INSKO Julkaisu 50-73. Helsinki 1973, Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus.

Medium Voltage Products, 100,000 Medium-Voltage Sensors Produced in Brno, CZ Significant production milestone. 2013, ABB. [WWW]. [Viitattu 7.3.2014]. Saatavissa: [http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/f3461bb650b03042c1257c19004d43a0/\\$file/100T_Sensor_article_1VLG000732%20Rev.-.%20en%202013.10.30.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/f3461bb650b03042c1257c19004d43a0/$file/100T_Sensor_article_1VLG000732%20Rev.-.%20en%202013.10.30.pdf)

Mörsky J. Relesuojaustekniikka. 1. painos, Otatieto 540. Hämeenlinna 1992, Otatieto Oy.

Niemelä J. 20 kV kojeiston suunnittelu sähkövoimalaboratorioon. Opinnäytetyö. Kemi 2010. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu. [WWW]. [Viitattu 5.3.2014]. Saatavissa: http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/21394/Niemela_Jarmo.pdf?sequence=1

Oikosulkukysymykset. INSKO Julkaisu 36–73. Helsinki 1973, Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus.

Pirttilä, V. Enson Kotkan tehtaiden sähköverkon oikosulku- ja maasulkusuojaus. Diplomityö. Tampere 1982. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto.

Pitkänen, Timo. 2013. Energiapäällikkö, UPM Rauma. Rauma. Haastattelu 11.12.2013.

Prysmian Group Suomi. Voimakaapelit 10 ja 20 kV. [WWW]. [Viitattu 17.2.2014]. Saatavissa: <http://fi.prysmiangroup.com/en/index.html>

Rauma esittely. 2014. Rauma. Sisäinen esitys.

Rauman metsäteollisuuden aikajana. 2014. Rauma. Sisäinen esitys.

Reka Kaapeli Oy. Alumiinivoimakkaapelit 6/10 kV. [WWW]. [Viitattu 17.2.2014]. Saatavissa: <http://www.reka.fi/>

Relekoestuspöytäkirjat ja relekortit. 2013. Rauma. Sisäiset asiakirjat.

Salminen P. Teollisuussähköverkon mallintaminen ja vikavirtatarkastelut. Diplomityö. Tampere 2008. Tampereen teknillinen yliopisto. [WWW]. [Viitattu 16.9.2013]. Saatavissa:

http://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/pdf%20julkiset%20dtyot/Salminen_Petri_julk.pdf

SFS 6001+A1+A2. Suurjännitesähköasennukset. 3. painos. Helsinki 2009, Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SPAJ 141 C Yhdistetty ylivirta- ja maasulkurele: Käyttöohje ja tekninen selostus. 2002, ABB. [WWW]. [Viitattu 6.3.2014]. Saatavissa: [http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/b8bb19aada393dfbc2256c7e00466c2d/\\$file/fm_spaj141c_fi_bba.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/b8bb19aada393dfbc2256c7e00466c2d/$file/fm_spaj141c_fi_bba.pdf)

Sähkökaaviot. Rauma. Sisäiset dokumentit.

Sähköturvallisuuslaki 14.6.1996/410. Helsinki 1996, Kauppa- ja teollisuusministeriö. [WWW]. [Viitattu 2.2.2014]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1996/19960410>

Sähköturvallisuusmääräykset A1-93. Helsinki 1993. Sähkötarkastuskeskus.

Teknisiä tietoja ja taulukoita. 10. painos. Vaasa 2000, suomalaiset ABB-yhtiöt.

Teollisuuden sähköverkot 2 – oiko- ja maasulkusuojaus. INSKO Julkaisu 131-85. 1985, Insinööritieto Oy.

Tutkintotyö. 2013. Rauma. Yksityinen tiedonanto.

Tuuri A. UPM-Kymmene: Metsän jättiläisen synty. Keuruu 1999, Otavan Kirjapaino Oy.

UPM vuosikertomus 2012. [WWW]. [Viitattu 23.10.2013]. Saatavissa:
<http://www.upm.com/FI/SIJOITTAJAT/Documents/UPMVuosikertomus2012.pdf>

Vanhat Strömbergin kojeistot Raumalla. Rauma. Sisäinen asiakirja.

Verkostolaskelmat. 2013. Rauma. Sisäinen selvitys.

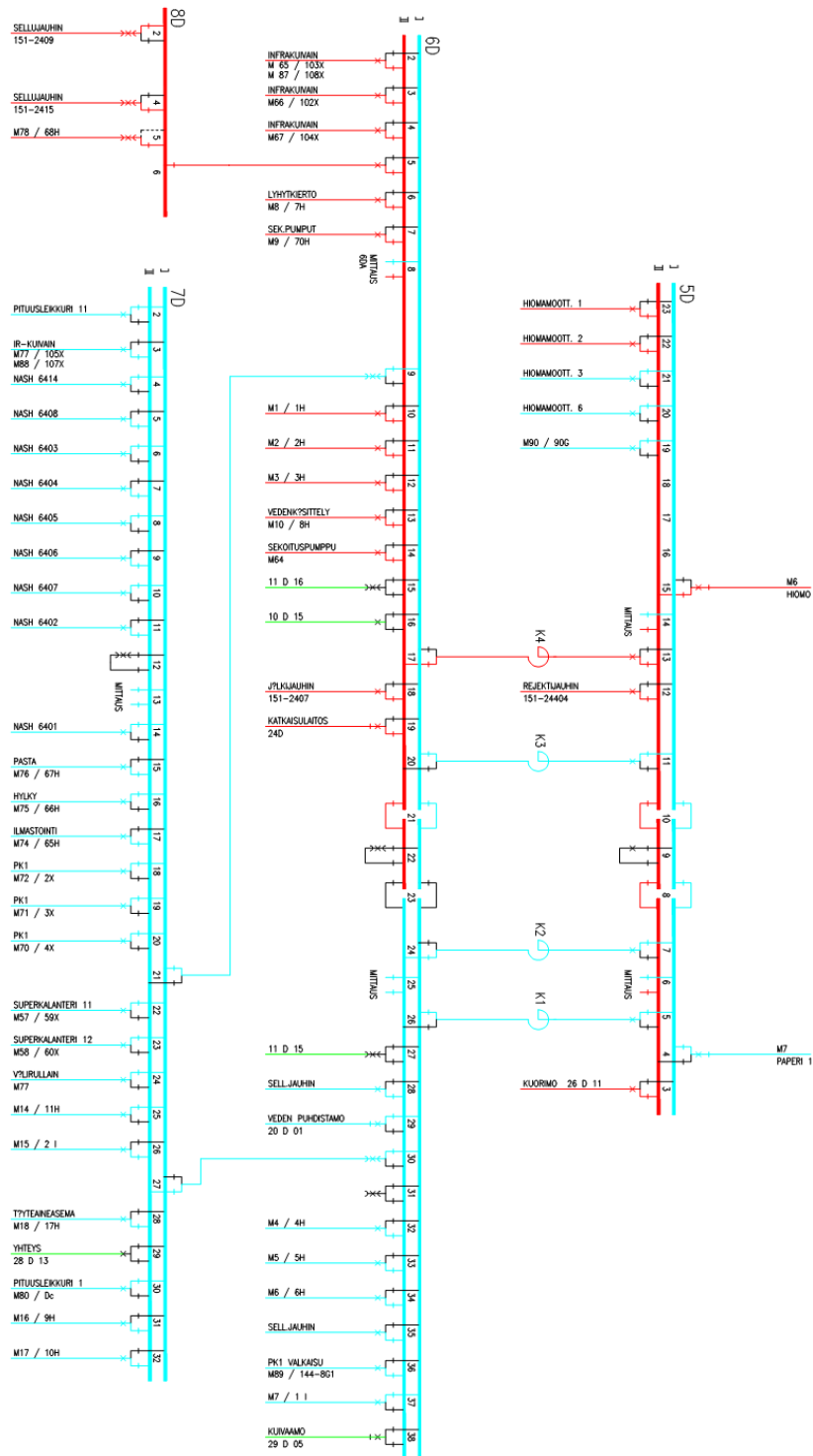
Vikailmoitus. 20.4.2013. Rauma. Sisäinen järjestelmäkirjaus.

LIITE1: YLIVIRTARELEEN SUOSITELTAVAT VÄ- HIMMÄISASETTELUT KYTKETTÄVÄN MUUNTA- JATEHON SUHTEEN

| Muuntaja | | Hetkellinen laukaisu (0,05s) | | | | | | Aikahidastettu laukaisu 0,3s | | | | | |
|----------|----------|------------------------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|------------------------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|
| Ikä | Sn [MVA] | Elektroninen rele | | | Mekaaninen rele | | | Elektroninen rele | | | Mekaaninen rele | | |
| | | 6 kV | 10 kV | 20 kV | 6 kV | 10 kV | 20 kV | 6 kV | 10 kV | 20 kV | 6 kV | 10 kV | 20 kV |
| 1 | 0,5 | 217 | 130 | 65 | 367 | 220 | 110 | 33 | 20 | 10 | 67 | 40 | 20 |
| 1 | 0,7 | 283 | 170 | 85 | 500 | 300 | 150 | 67 | 40 | 20 | 117 | 70 | 35 |
| 1 | 1 | 400 | 240 | 120 | 700 | 420 | 210 | 133 | 80 | 40 | 217 | 130 | 65 |
| 1 | 2 | 767 | 460 | 230 | 1333 | 800 | 400 | 367 | 220 | 110 | 633 | 380 | 190 |
| 2 | 2 | 1550 | 930 | 465 | 2683 | 1610 | 805 | 733 | 440 | 220 | 1267 | 760 | 380 |
| 3 | 2 | 2317 | 1390 | 695 | 4017 | 2410 | 1205 | 1100 | 660 | 330 | 1917 | 1150 | 575 |
| 4 | 2 | 3100 | 1860 | 930 | 5350 | 3210 | 1605 | 1467 | 880 | 440 | 2550 | 1530 | 765 |
| 1 | 3,15 | 1183 | 710 | 355 | 2050 | 1230 | 615 | 683 | 410 | 205 | 1167 | 700 | 350 |
| 2 | 3,15 | 2367 | 1420 | 710 | 4100 | 2460 | 1230 | 1350 | 810 | 405 | 2333 | 1400 | 700 |
| 3 | 3,15 | 3550 | 2130 | 1065 | 6150 | 3690 | 1845 | 2033 | 1220 | 610 | 3517 | 2110 | 1055 |
| 1 | 5 | 1817 | 1090 | 545 | 3150 | 1890 | 945 | 1200 | 720 | 360 | 2083 | 1250 | 625 |
| 2 | 5 | 3633 | 2180 | 1090 | 6300 | 3780 | 1890 | 2400 | 1440 | 720 | 4150 | 2490 | 1245 |
| 1 | 10 | 3467 | 2080 | 1040 | 6000 | 3600 | 1800 | 2650 | 1590 | 795 | 4583 | 2750 | 1375 |
| 2 | 10 | 6933 | 4160 | 2080 | 12000 | 7200 | 3600 | 5300 | 3180 | 1590 | 9167 | 5500 | 2750 |
| 1 | 15 | 5050 | 3030 | 1515 | 8733 | 5240 | 2620 | 4100 | 2460 | 1230 | 7083 | 4250 | 2125 |
| 2 | 15 | 10083 | 6050 | 3025 | 17500 | 10500 | 5250 | 8200 | 4920 | 2460 | 14183 | 8510 | 4255 |
| 1 | 16 | 5350 | 3210 | 1605 | 9267 | 5560 | 2780 | 4383 | 2630 | 1315 | 7583 | 4550 | 2275 |
| 2 | 16 | 10717 | 6430 | 3215 | 18500 | 11100 | 5550 | 8767 | 5260 | 2630 | 15183 | 9110 | 4555 |
| 1 | 20 | 6583 | 3950 | 1975 | 11400 | 6840 | 3420 | 5533 | 3320 | 1660 | 9583 | 5750 | 2875 |
| 1 | 25 | 8083 | 4850 | 2425 | 14000 | 8400 | 4200 | 6950 | 4170 | 2085 | 12033 | 7220 | 3610 |
| 1 | 31,5 | 10000 | 6000 | 3000 | 17333 | 10400 | 5200 | 8783 | 5270 | 2635 | 15200 | 9120 | 4560 |
| 1 | 30 | 9567 | 5740 | 2870 | 16567 | 9940 | 4970 | 8367 | 5020 | 2510 | 14483 | 8690 | 4345 |
| 1 | 35 | 11033 | 6620 | 3310 | 19167 | 11500 | 5750 | 9767 | 5860 | 2930 | 16833 | 10100 | 5050 |
| 1 | 40 | 12467 | 7480 | 3740 | 21667 | 13000 | 6500 | 11150 | 6690 | 3345 | 19333 | 11600 | 5800 |
| 1 | 80 | 23500 | 14100 | 7050 | 40833 | 24500 | 12250 | 21833 | 13100 | 6550 | 37833 | 22700 | 11350 |

Lähde: Teollisuuden sähköverkot 2

LIITE2: PK1:N JA HIOMON JAKELUKAAVIO



Lähde: Sähkökaaviot

LIITE3: RELESUOJAUSTOIMINNOT

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]